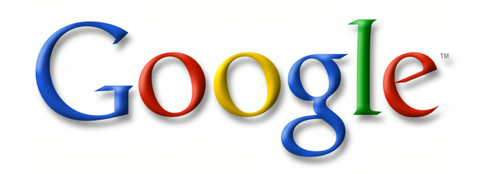


Lehrbuch der Physik.

Einschließlich der

Physik des Himmels (Himmelskunde), der Luft (Meteorologie) und der Erde (Physikalische Geographie).

Gemäß der neueren Anschauung und mit den neuesten Fortschritten.

Für

Gymnasien, Realschulen und andere höhere Lehranstalten

bearbeitet von

Professor Dr. Paul Reis,

Gymnasiallehrer in Mainz.

> Die allgemeinen Principien der Mechanik bilden die einzig wahre und dauernde Grundlage nicht nur für die Technik, sondern auch für das ganze weite Gebiet der erklärenden Naturwissenschaften.
>
> Redtenbachers Wahlspruch 1840.



Vierte verbesserte und vermehrte Auflage.

Mit 297 in den Text gedruckten Holzschnitten und 829 Aufgaben nebst Lösungen.

Leipzig

Verlagsbuchhandlung von Quandt & Händel.

1878.

Vorwort zur ersten Auflage.

In diesem Buche wird zum erstenmale der Versuch einer Darstellung der modernen Physik für höhere Schulen gemacht; dasselbe hat selbst in den größeren Lehrbüchern keinen Vorgänger. Es wird dies hier ausdrücklich hervorgehoben, um in den großen, mit einer solchen Darstellung verbundenen Schwierigkeiten eine Entschuldigung zu gewinnen für die lange Verzögerung von nahezu drei Jahren, die zwischen der ersten Lieferung und dem Schlußhefte verflossen sind, sowie für manches selbst dem eigenen Streben nicht Genügende, was bei einer neuen Behandlungsweise nicht zu vermeiden ist. Dieselbe besteht darin, daß die physikalischen Erscheinungen und Gesetze aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft und den Anschauungen von Clausius über die innere Bildung des Stoffes auf dem Wege der Deduction abgeleitet und durch das Experiment bestätigt werden, mit Ausnahme der Erscheinungen des Magnetismus und der Elektricität, welche noch der Induction angehören. Aus dem erwähnten Princip wird zuerst der Grundsatz der virtuellen Geschwindigkeiten abgeleitet und aus diesem dann alle Gleichgewichtsgesetze; auch die Grunderscheinung der flüssigen Körper, die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes, und damit die ganze Lehre von den flüssigen und luftförmigen Körpern werden auf jenes Princip und jene Grundanschauungen zurückgeführt; und da die Wellenlehre eine Anwendung der Mechanik ist, so stehen auch die Lehre vom Schalle, vom Lichte und von der strahlenden Wärme auf dem Boden des Grundgesetzes. Eine directe Anwendung dagegen findet dasselbe in der Körperwärme, indem das Gesetz der Aequivalenz von Wärme und Arbeit, die Thatsache der Erzeugung einer unbegrenzten Wärmemenge aus einer begrenzten Stoffmenge durch Bewegung aus demselben hervorgehen, und, da jenes Gesetz und diese Thatsache durch zahlreiche Versuche über allen Zweifel erhoben sind, die mechanische Wärmetheorie, d. i. die Auffassung der Körperwärme als Molekularbewegung gebieterisch verlangen. Deßhalb ist in diesem Lehrbuche derselbe Gang, der schon seit fast einem Jahrhundert für das Licht befolgt wird, die Ableitung der Erscheinungen aus der Bewegungstheorie, auch für die Wärme und zwar ebenfalls zum erstenmale in einem Lehrbuche eingeschlagen worden. Ich durfte dies um so eher versuchen, als mich Niemand einer Vorliebe für die Bewegungstheorie zeihen kann, indem ich vor noch nicht zehn Jahren den letzten Versuch einer Rettung der alten Stofftheorie, die Durchführung der Hypothese, Wärme sei Aether, gewagt hatte, aber in der Folge mich beugen mußte vor dem Gewichte der erwähnten Consequenzen, insbesondere aber vor der glänzenden experimentellen Bestätigung der von der mechanischen Wärmetheorie gemachten Voraussagungen der Erniedrigung des Eisschmelzpunktes durch Druck, der Constanz der Wärmecapacität der Gase, der geringeren specifischen Wärme des Wasserdampfes, der theoretischen Berechnung der latenten Wärme des Wasserdampfes, Thatsachen, durch welche die Bewegungstheorie der Wärme dieselbe Festigkeit erhielt, wie die Schwingungstheorie des Lichtes durch die circulare Polarisation und die experimentelle Bestimmung der Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser.

Wenn nun hiernach kein Zweifel mehr besteht an der Möglichkeit der con-

sequenten Durchführung der Deduction, so könnte doch noch die Frage gestellt werden, ob diese Methode überhaupt lehrhaft und ob sie insbesondere für höhere Schulen lehrfähig sei. Ohne den hohen Werth der Induction für die Forschung nur entfernt in Frage stellen zu wollen, obwohl auch hier an Bessels Wort über seine Beobachtungen des Kometen von 1837 erinnert werden könnte, muß doch gerade die Anwendung der inductiven Methode auf die Geschichte der physikalischen Lehrthätigkeit sofort den Vorzug der Deduction anerkennen; denn wohl in keinem Lehrbuche, in keiner Schule, abgesehen von dem Hörsaale eines in seiner Methode allmälig verknöcherten Universitätsprofessors, wird die Mechanik der festen Körper d. i. die allgemeine Mechanik anders als deductiv vorgetragen, und das Experiment anders als zur Bestätigung benutzt; und wer möchte leugnen, daß dieser Theil der Physik am meisten den Character der Wissenschaftlichkeit habe. Wenn nun für die übrigen Theile der Physik die Deduction ebenfalls möglich ist, warum sollten diese dann des wissenschaftlichen Characters entbehren, warum insbesondere des inneren Zusammenhanges, der vorwiegend das Interesse der dem Idealen zugewendeten Jugend erweckt, der den Ueberblick erleichtert und dadurch die Kenntnisse befestigt und hierdurch eine immer weitere und raschere Erkenntniß ermöglicht. Noch weniger aber als die Lehrhaftigkeit scheint mir die Lehrfähigkeit der Deduction in Frage zu stehen; Schüler, die Sophokles und Tacitus verstehen sollen, die Logik und Propädeutik pflegen, denen man die Trigonometrie des schiefwinkeligen Dreiecks zumuthet, die nach ein bis zwei Jahren in alle Tiefen der Wissenschaft eindringen sollen, können auch die Deduction des Brechungsgesetzes und der Gesetze der specifischen Wärme verstehen; man traue es ihnen nur zu, und der Erfolg wird nicht ausbleiben. Ich unterrichte hier seit einer Reihe von Jahren nach dieser Methode, nicht blos an den oberen Gymnasialklassen, sondern auch an den Oberklassen des Scharvogel'schen Institutes, das ungefähr auf der Stufe der preußischen Realschulen zweiter Ordnung steht, und ich habe keine Ursache zur Unzufriedenheit. Allerdings soll den Schülern auch die inductive Methode bekannt werden; dazu bietet aber der Magnetismus und die Elektricität Gelegenheit genug, da diese Lehren sich der Deduction zum größten Theile noch ganz entziehen.

Eine letzte und wesentliche Frage ist die, ob der ganze Inhalt des Buches mit der wünschenswerthen Gründlichkeit in der jetzt zur Verfügung stehenden Zeit vorgenommen werden könne; dies muß allerdings für die neuere preußische Einrichtung, welche die Physik für die ganze Secunda auf eine wöchentliche Stunde herabgedrückt hat, verneint werden; doch wird es auch für diesen hoffentlich bald dem Bedürfnisse weichenden Nothstand dem Lehrer leicht werden, die richtige Auswahl zu treffen, weniger wichtige Aufgaben, das meist dafür eingerichtete klein Gedruckte wegzulassen. In vielen süddeutschen, z. B. hessischen Gymnasien sind für alle Klassen wöchentlich 2 Stunden für Naturkunde bestimmt. Bei dieser Einrichtung würde es sich empfehlen, wie es z. B. in den badischen Lyceen der Fall ist, in einer der Mittelklassen z. B. in Quarta einen physikalischen Vorcurs einzuschieben, und in diesem die einfachsten und wichtigsten Grunderscheinungen durchzunehmen, wodurch nebenbei die Abnormität wegfiele, daß die zahlreichen Abiturienten der Untersecunda, die einstigen Freiwilligen, das Gymnasium ohne Kenntniß des Thermometers und Barometers verlassen. Wenn alsdann in Untersecunda die Grundzüge der Chemie folgen, die dort ganz gut verstanden und mit Vorliebe aufgenommen werden, dann kann in den drei letzten Jahren der Inhalt des Buches ziemlich vollständig bewältigt werden, in Obersecunda die Einleitung, Magnetismus und Elektricität, in Unterprima die Mechanik und die Wellenlehre, in Oberprima Akustik, Optik und Wärmelehre, ein Gang, den wir im Mainzer Gymnasium befolgen.

Für die zahlreichen freundlichen Zuschriften von Collegen und Fachgenossen, die ich nicht alle im Einzelnen beantworten konnte, sage ich hier den herzlichsten Dank und verbinde damit die dringende Bitte, mir in dem Buche aufgefundene Druckfehler und Versehen, sowie Wünsche um Aenderungen ohne Rückhalt anzuzeigen, damit sie bei einer neuen Auflage, soweit es der Plan des Ganzen gestattet, berücksichtigt werden können.

Wenn man von einem Kinde, dem man viele Jahre harter Arbeit und schwerer Sorge gewidmet hat, mit Wehmuth scheidet, so mag es dieser wohl gestattet sein, sich ein wenig durch die besten Wünsche und die Bitte um Nachsicht, wo es nicht jedem Anspruche gerecht werden sollte, zu mildern.

Mainz, den 16. Mai 1872.

Dr. Paul Reis.

Vorwort zur vierten Auflage.

In der vorliegenden vierten Auflage wurden aus Rücksicht auf die Schulen, an denen das Buch eingeführt ist, keine durchgreifenden Aenderungen vorgenommen. Nur die durch Beschluß des Bundesrathes vom 8. October 1877 vorgeschriebenen abgekürzten Bezeichnungen der Maße und Gewichte mußten durchgängig angewendet werden, an welche sich sachgemäß die vom Verein der deutschen Ingenieure vorgeschlagenen übrigen Abkürzungen anschlossen; ebenso wurde in den chemischen Processen und Namen die Anschauung der modernen Chemie vollständig durchgeführt; hierdurch konnte der Abschnitt über die Unterschiede der älteren und der modernen Chemie wegfallen. Außer diesen das Ganze wenig alterirenden, durchgehenden Aenderungen wurde nur alles Neue von Bedeutung zugefügt, und zwar so ausführlich, als für das Verständniß nothwendig erschien. Von diesen Zusätzen sind nur wenige rein wissenschaftlich, wie z. B. die Marsmonde und die merkwürdigen Versuche von Cailletet und Raoul Pictet über die Condensation der permanenten Gase. Die meisten haben auch praktische Bedeutung, wie das Telephon von Bell, das Radiometer von Crookes, die magnet-elektrischen Maschinen, besonders die von Gramme und von v. Hefner-Alteneck, die als Lichtmaschinen, zu Metallniederschlägen u. s. w. immer mehr Anwendung finden und zum Arbeitstransport, in der Metallurgie, als Heizmaschinen u. s. w. eine wohl kaum geahnte Zukunft haben mögen; sodann die kleinen Arbeitsmaschinen, wie der Sparmotor von Hock, die Heißluftmaschine von Lehmann, der Wassermotor von Schmid, welche täglich mehr in das gewöhnliche Leben Eingang finden; auch einer der zahlreichen auf der saugenden Wirkung der Luftstrahlen beruhenden neuen Dampfstrahlapparate, Körtings Dampfstrahlunterwindgebläse wurde, wie alle genannten neuen Erfindungen, durch Figur und Erklärung dargestellt.

Es durfte in der vierten Auflage um so mehr eine praktische Bereicherung des Buches am Platze sein, als die dritte Auflage vorwiegend theoretische und pädagogische Verbesserung angestrebt hatte. In dieser war deßhalb der grundlegende Abschnitt über Arbeit und Erhaltung der Arbeit den Fortschritten der Wissenschaft entsprechend umgestaltet und dafür die reine Bewegungslehre nach Vorschlägen Bauers verbessert worden, und hatten die Beweise für die Gleichgewichts- und Fallgesetze eine schärfere und klarere Fassung erhalten. Mit großem Danke würde ich es begrüßen, wenn es einem Collegen gelingen würde, die Cen-

trifugalkraft direct aus der lebendigen Kraft abzuleiten, was ich bis jetzt vergeblich versucht habe, während es doch möglich sein muß und den vielfachen Mißverständnissen dieser Kraft wohl vorbeugen könnte. Mit eben so großem Danke gedenke ich der einfachen Theorie des Horizontalpendels, welche mein verehrter College Stoll mir zur Verfügung gestellt hat; demselben Collegen verdanke ich auch den Beweis für das Minimum der Ablenkung des Lichtes, den ich als ersten unanfechtbaren elementaren Beweis an Stelle des alten angefochtenen aufgenommen habe; ich muß dieses hier speciell hervorheben, weil noch in letzter Zeit in wissenschaftlichen Zeitschriften die Behauptung zu lesen war, daß ein solcher Beweis noch nicht existire, während doch Stolls Beweis schon in dem Bensheimer Gymnasialprogramm vom Jahr 1873 gestanden hatte. Zu den pädagogischen Verbesserungen rechne ich auch die Aufnahme der Bauer'schen Spiegel- und Linsengesetze, weil dieselben nicht nur eine einfachere Ableitung der Bilderregeln möglich machen, sondern auch die verschiedenen Spiegel und Linsen in einen inneren Zusammenhang bringen, sowie die Anwendung der Poggendorff'schen Fallmaschine zum Nachweise der wichtigen Formel $k = ma$, wie überhaupt dieser einfache Apparat zu höchst interessanten Versuchen Anlaß bietet und daher den Collegen bestens empfohlen werden kann. Unter den zahlreichen Nachträgen neuer wissenschaftlicher Forschungsergebnisse in der dritten Auflage mögen wie von den pädagogischen Aenderungen nur einige erwähnt werden. In dem Abschnitte über chemische Affinität wurde gezeigt, wie man diese Kraft auf eine Mechanik der Atome zurückführt und dadurch im Stande ist, die meisten Räthsel der chemischen Verwandtschaft zu lösen. In die Lehre von der Capillarität wurden die Grundbegriffe der Arbeiten Quincke's und Wilhelmy's und die interessanten Resultate über die Wirkungssphäre der Molekularkräfte beigefügt, welche in den Forschungen über die innere Reibung der Gase eine Ergänzung fanden, die uns das dunkle Gebiet der Molekularwelt mehr und mehr erhellen. Die mechanische Wärmetheorie gewann wesentlich durch zwei directe Anwendungen derselben, die amerikanische Pulverramme und Windhausens Kältemaschine, sowie durch die einfache Ableitung aller Gesetze der specifischen Wärme aus derselben. Der Abschnitt über Dielektricität bot Gelegenheit zu der Bemerkung, daß auch die elektrische Kraft in einem inneren Zusammenhange mit den übrigen aus Atombewegungen bestehenden Naturkräften steht, während die abnorme Dispersion wie die Spectralanalyse zeigt, daß jede Erhellung bisher dunkler Gebiete neue unerforschte Regionen eröffnet. Auch die Lehre vom Schalle erfuhr manche Vermehrung, von denen nur Tyndall's Seeversuche und Reynolds' Schallbrechung im Großen angeführt sein mögen, welche manche Räthsel des Hörens auf größere Entfernung lösen. In die Lehre vom Magnetismus wurden die Forschungsresultate Jamins aufgenommen, welche schon in dem Telephon und in den magnet-elektrischen Maschinen zu fruchtbarer Anwendung kamen. Die Physik des Himmels wurde durch Zöllner's Kometentheorie an einer sehr dunkeln Stelle wesentlich gefördert und die Physik der Luft durch die Gradienten und Isobaren vervollständigt, da diese neuen Begriffe nicht blos in den Publicationen der Seewarte häufig vorkommen, sondern auch das Verständniß von Wind und Wetter erleichtern.

Diese durchaus nicht erschöpfenden Beispiele mögen wohl ausreichen zu dem Nachweise, daß auch die dritte und vierte Auflage berechtigt sind, die Titelstelle „gemäß der neueren Anschauung und mit den neuesten Fortschritten" zu tragen.

Mainz, den 17. Mai 1878.

Professor **Dr. Paul Reis.**

Uebersicht des Inhaltes.

Die Natur und die Naturwissenschaft (S. 1) Die Aufgabe der Physik (S. 2)
Das Verfahren der Physik (S. 5)

Einleitung.

Erster Theil der Physik.

Die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik.

Erste Abtheilung.

Zweite Abtheilung.

Dritte Abtheilung.

Zweiter Theil der Physik.

Die Lehre von der Molekularbewegung oder die engere Physik.

Berichtigungen.

S. 141 Z. 25 v. oben lies Achse statt Masse.
S. 135 Z. 29 v. oben lies 4 statt 5.
S. 312 Z. 18 v. unten lies geometrischen statt optischen.
S. 313 Z. 10 v. unten muß stehen
$iF > f$ und $i'F < f$.
S. 323 Z. 1 v. unten lies $\alpha - \beta$ statt $\alpha + \beta$.

Lehrbuch der Physik.

Die Natur und die Naturwissenschaft.

Unter Natur verstehen wir den Inbegriff aller sinnlich wahrnehmbaren Dinge. **1** Die einzelnen Dinge werden Naturkörper oder Naturgegenstände genannt.

Der „Naturkörper" steht im Gegensatze zu dem durch menschliche Handfertigkeit erzeugten Kunstkörper, an dem indeß nur die Form Gegenstand der Kunst ist, während der Stoff Naturgegenstand bleibt. — Die beiden Ausdrücke „Naturkörper" und „Naturgegenstände" haben nicht genau denselben Umfang; denn ein Naturkörper ist nur dasjenige Ding, das sofort mit einem oder mehreren der fünf Sinne erfaßt wird, während zu den Naturgegenständen auch solche Dinge gezählt werden, wie Raum, Zeit, Kraft u. s. w., die wir zwar nicht unmittelbar mit den Sinnen wahrnehmen, welche uns aber doch durch die sinnliche Erfahrung zum Bewußtsein kommen. Indessen zieht die Naturwissenschaft nur dasjenige von diesen Naturgegenständen in den Kreis ihrer Betrachtung, was sinnlich erfahrungsmäßig ist. Die Wesenheiten dieser und aller Dinge dagegen werden von der Metaphysik zu ergründen gesucht.

Die Naturwissenschaft oder Naturkunde befaßt sich mit den Eigenschaften **2** und Veränderungen der Naturgegenstände, sowie mit den Gesetzen und Ursachen dieser Eigenschaften und Veränderungen. Die Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände werden Erscheinungen oder Phänomene genannt.

Wenn ein Körper passend unterstützt ist, so ruht er; das ist eine Eigenschaft des Körpers. Entziehen wir ihm die Unterstützung, so fällt er; das ist eine Veränderung des Körpers; beides sind Erscheinungen. Wenn wir ausfindig gemacht haben, daß der Körper in der ersten Secunde des freien Fallens 5 Meter zurücklegt, so haben wir ein Gesetz der zweiten Erscheinung gefunden. Wenn endlich erkannt worden ist, daß die Erde eine anziehende Kraft ausübt, und daß demnach alle nicht unterstützten Körper sich der Erde nähern müssen, so ist auch die nächste Ursache der zweiten Erscheinung angegeben. Wenn wir nun hieraus schließen, daß ein unterstützter Körper deßhalb nicht fallen kann, weil die Festigkeit der Stütze größer ist als die Anziehung der Erde, so haben wir auch die Ursache der ersten Erscheinung, der Eigenschaft der Ruhe, erkannt.

Die Naturkunde zerfällt in die Naturlehre und die Naturgeschichte. Die Naturlehre ist die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände im Allgemeinen; die Naturgeschichte ist die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Naturgegenstände im Besonderen.

Ein nicht unterstützter Körper fällt. Diese Erscheinung zeigen im luftleeren Raume alle Körper; demnach gehört die Betrachtung derselben in die Naturlehre. Ein der Unterstützung beraubter Vogel kann sich in der Luft durch die Kraft seiner Flügel gegen das Fallen schützen. Dies ist eine Erscheinung, die einer besonderen Abtheilung von Naturgegenständen angehört; demnach fällt sie der Naturgeschichte anheim.

Wenn die Naturgeschichte die Körper im Besonderen betrachtet, so muß sie **3** auch sofort Unterschiede und Uebereinstimmungen derselben wahrnehmen und muß daher die Körper eintheilen. Sie theilt alle Naturkörper zunächst in organische und unorganische Naturkörper. Organische Körper sind solche, welche Werkzeuge oder Organe für Veränderungen an sich selbst besitzen; unorganische Körper sind dagegen solche, welche keine Werkzeuge zu eigener Veränderung haben.

Die Thiere haben Glieder für ihre eigene Bewegung, sie haben Sinne für die Wahrnehmung und Empfindung; die Pflanzen sind mit Organen für das Wachsthum und für die Bildung der Frucht versehen. Wird dagegen an einem Steine nicht durch einen äußeren Einfluß etwas verändert, so bleibt er immer derselbe.

Die selbständigen Veränderungen der organischen Körper werden Lebensthätigkeiten genannt; es gibt deren 4: Ernährung, Fortpflanzung, Bewegung und Empfindung. Hiernach theilt man die organischen Wesen ein in solche, die nur 2 Lebensthätigkeiten, Ernährung und Fortpflanzung, besitzen: Pflanzen; sodann in solche, welche alle 4 Lebensthätigkeiten ausüben: Thiere. Die Gesammtheit der Pflanzen bildet das Pflanzenreich, die Gesammtheit der Thiere das Thierreich, und die Gesammtheit aller unorganischen Körper das Mineralreich.

Gemäß dieser Eintheilung der Natur kann auch die Naturgeschichte zerlegt werden: die Lehre von den Eigenschaften und Veränderungen der Thiere heißt Zoologie, die Wissenschaft von den Eigenschaften und Veränderungen der Pflanzen nennt man Botanik. Hilfswissenschaften sind: die Anatomie oder die Lehre von der Beschaffenheit der Organe, und die Physiologie oder die Lehre von den Verrichtungen der Organe.

Die Naturgeschichte des Mineralreiches zerfällt in mehrere Wissenschaften. Man kann nämlich jedes der drei Naturreiche in drei Kreise theilen: das Thierreich in Wirbelthiere, Gliederthiere und Bauchthiere, das Pflanzenreich in Dicotyledonen, Monocotyledonen und Acotyledonen, und das Mineralreich in Versteinerungen, Felsarten und Mineralien. Die Wissenschaft von den Mineralien, d. i. den gleichartigen unorganischen Naturkörpern, heißt Mineralogie; die Lehre von den Felsarten, welche die Erdschichten und Gebirgsmassen bilden und meist aus mehreren Mineralien gemengt sind, heißt Geognosie. Die Versteinerungen sind solche Pflanzen- oder Thierkörper, in denen der organische Stoff allmälig durch Stein ersetzt worden ist, während die Körperform erhalten blieb; die Wissenschaft von den Versteinerungen wird Petrefactologie genannt. — Alle drei Kreise des Mineralreiches können nur durch äußere Einflüsse verändert, umgebildet werden und haben durch solche Umbildungen ihren jetzigen Zustand erhalten. Die Wissenschaft von der Entstehung und Umbildung der Mineralien, der Erdschichten und Gebirgmassen, ja der ganzen Erdmasse ist die Geologie. Im weiteren Aufschreiten vom Kleineren zum Größeren könnten wir an dieselbe schließen die physische Astronomie, d. i. die Beschreibung der unorganischen Körper außerhalb der Erde, der sogenannten Weltkörper. Doch wird dieselbe gewöhnlich mit den übrigen astronomischen Wissenschaften vereinigt.

4 Die Naturlehre wird in zwei Hauptwissenschaften getheilt: die Chemie und die Physik, welche beide wieder in große Kreise von Einzelwissenschaften aus einander gehen. Die Chemie ist die Lehre von den inneren oder Stoff-Aenderungen der Körper; die Physik ist im Gegensatze zu der Chemie die Wissenschaft von den äußeren oder Zustand-Aenderungen der Körper. Von der Physik haben sich zu voller Selbständigkeit abgezweigt: die Physik des Himmels oder die sphärische Astronomie, d. i. die Wissenschaft von den äußeren Veränderungen oder Bewegungen der Himmelskörper; die Physik der Luft oder Meteorologie, d. i. die Wissenschaft von den Veränderungen in der Lufthülle; die Physik der Erde, welche theils mit der Geologie, theils mit der physischen, theils mit Pflanzen- und Thier-Geographie zusammenfällt.

Die Aufgabe der Physik.

5 **Physik und Chemie.** Die Aufgabe der Physik ist die Erforschung der Zustandänderungen. Dieselben sind nicht mit einer Aenderung des Stoffes verbunden; die Erforschung der Stoffänderungen ist die Aufgabe der Chemie.

Wenn der Schwefel bei einer gewissen Hitze schmilzt, so hat er nur eine Zustandänderung erfahren; denn er ist blos aus dem festen Zustande in den flüssigen Zustand übergegangen; der flüssige Schwefel enthält aber durchaus denselben Stoff wie der feste. Wenn dagegen der Schwefel bei einer gewissen Hitze und Luftzutritt verbrennt, so ist dies eine Stoffänderung; denn das Product der Verbrennung enthält nicht allein Schwefel, sondern auch Sauerstoff. — Wenn wir Wasser auf einen gewissen Grad erhitzen und auf demselben erhalten, so verwandelt es sich in Dampf. Darin liegt eine blose Zustandänderung, eine Verwandlung flüssigen Wassers in luftförmiges Wasser; denn der Wasserdampf hat dieselben Bestandtheile, dieselben Verwandtschaften, dieselben chemischen Einwirkungen wie das Wasser. Wird dagegen Phosphor längere Zeit auf einer gewissen Temperatur erhalten, so entsteht der rothe oder amorphe Phosphor, der zwar durchaus denselben Stoff enthält, wie der gewöhnliche Phosphor, aber andere Verwandtschaften, andere chemische Wirkungen hat als dieser, und daher als eine chemische oder Stoffänderung desselben angesehen wird. — Wird Platin einer, wenn auch sehr großen, Hitze ausgesetzt, so wird es nur heißer, es erleidet nur eine Zustandänderung, es ist, wie man sagt, aus einem niederen Temperatur-Zustande in einen höheren übergegangen. Erhitzt man dagegen Quecksilber an der Luft Monate lang ununterbrochen zum Kochen, so verwandelt es sich in Quecksilberoxyd; dieser Vorgang ist eine Stoffänderung, denn das Quecksilberoxyd besteht nicht aus reinem Quecksilber, sondern aus Quecksilber und Sauerstoff. — Erfährt ein ruhender, freier Körper einen Stoß, so bewegt er sich, er geht aus dem Zustande der Ruhe in den Zustand der Bewegung über; dies ist eine blose Zustandänderung. Erfährt dagegen Knallquecksilber einen starken Stoß, so erleidet es eine Stoffänderung, es zersetzt sich, und der zurückbleibende Stoff ist von dem ursprünglichen durchaus verschieden. — Ein weißer Körper ist in einem lichtlosen Raume absolut schwarz, in einem mit ausschließlich rothem Lichte erleuchteten Raume roth, dagegen wenn Sonnenlicht auf ihn fällt, weiß. Dies sind blose Aenderungen des Lichtzustandes. Fällt dagegen Sonnenlicht auf weißes, mit Jodsilber durchdrungenes Papier, so wird dieser Stoff in seine Bestandtheile zersetzt, von denen der eine leicht entfernt werden kann. Durch das Licht ist hier eine Stoffänderung bewirkt worden. — Geht ein elektrischer Strom durch einen Draht, so wird derselbe glühend, er erleidet nur eine Aenderung seines Licht- und Wärme-Zustandes. Geht dagegen der elektrische Strom durch Wasser, so wird dasselbe in seine Bestandtheile zerlegt, es erleidet eine Stoffänderung. — Wenn man Glas mit einem Kautschuklappen reibt, so sprüht es stechende Funken; es ist aber durchaus Glas geblieben, es hat nur seinen elektrischen Zustand geändert, also nur eine Zustandänderung erfahren. Wenn man dagegen Phosphor reibt, so entzündet er sich und wird in feuchter Luft zu Phosphorsäure, einer sauren Flüssigkeit, die sich in jeder Beziehung vom Phosphor unterscheidet; es hat eine Stoffänderung stattgefunden, da die Phosphorsäure außer Phosphor noch Sauerstoff und Wasserstoff enthält. — Aus diesen Beispielen erhellt nebenbei, daß ein und derselbe Körper durch die eine Einwirkung nur eine Zustandänderung, durch eine andere eine Stoffänderung erfährt, während umgekehrt durch eine und dieselbe Einwirkung bei dem einen Körper nur eine Zustandänderung, bei dem anderen eine Stoffänderung erzielt wird. Daraus ergibt sich der enge Zusammenhang von Physik und Chemie.

6 **Naturgesetz. Grundgesetz. Axiom.** Die Physik hat bei der Erforschung der Zustandänderungen zunächst anzugeben, unter welchen Umständen eine solche Aenderung eintritt.

Beispiele: der Phosphor schmilzt bei einer etwas höheren Wärme, als sie das Blut der Vögel besitzt. Wenn ein Körper erwärmt wird, so vergrößert er meist seinen Rauminhalt, er dehnt sich aus. — Hinlänglich bewegliche Körper, welche dieselbe Art von Elektricität enthalten, entfernen sich von einander, sie stoßen einander ab. — Wird Wasser unter gewöhnlichen Umständen zu unserer gewöhnlichen Winterkälte abgekühlt, so wird es fest. Wenn wir hingegen Wasser von jedem Luftzuge, von jeder, auch der leisesten Erschütterung absperren, oder wenn wir auf dasselbe einen sehr starken Druck ausüben, oder wenn wir es in die heftigste Bewegung durch einander rütteln, oder wenn wir Salz in demselben auflösen, so gefriert es nicht bei der gewöhnlichen, sondern erst bei der stärksten Winterkälte.

Sind in solcher Weise die Umstände oder Bedingungen einer Erscheinung scharf angegeben, so erhält hierdurch der blose Ausspruch der Erscheinung schon etwas Gesetzmäßiges und kann daher wohl ein **Naturgesetz** genannt werden, wie dies auch häufig geschieht; denn aller Erfahrung gemäß tritt immer wieder dieselbe Erscheinung ein, wenn wieder dieselben Umstände stattfinden. Indessen versteht man doch in der Wissenschaft gewöhnlich unter Naturgesetz nicht den,

wenn auch noch so kurzen und scharfen Ausspruch einer Erscheinung, sondern ein Naturgesetz ist die Angabe, wie die bei einer Erscheinung auftretenden Größen von einander abhängen.

Fallen Lichtstrahlen auf eine glatte Fläche, so werden dieselben großentheils zurückgeworfen. Dies ist der kurze Ausspruch einer Erscheinung. Ein Gesetz dieser Erscheinung sprechen wir aus, wenn wir angeben, daß der Winkel, den die zurückgeworfenen Strahlen mit der Fläche machen, genau dem Winkel gleich ist, den die einfallenden Strahlen mit der Fläche einschließen, wie groß der letztere auch sein möge. — Gesetze, welche sich auf solche Grundeigenschaften der Körper beziehen, die auf alle oder wenigstens auf viele Erscheinungen Einfluß haben, werden Grundgesetze genannt. Eine Grundeigenschaft aller Körper ist die gegenseitige Anziehung derselben. Daß diese gegenseitige Anziehung der Körper um so größer wird, je mehr Masse die Körper haben, ist ein physikalisches Grundgesetz. — Grundgesetze sind nicht zu verwechseln mit den allgemeinen Sätzen oder Axiomen, die in der Physik, wie in der Mathematik, von großer Wichtigkeit sind, und Wahrheiten angeben, die nicht mehr aus anderen abgeleitet werden können, aber sofort als richtig einleuchten, oder durch tausendjährige Erfahrung als richtig bekannt sind. Ein solches Axiom ist z. B. der Satz: Kein Körper kann von selbst seinen Zustand ändern, ein Axiom, das man auch die Eigenschaft der Trägheit oder das Gesetz der Trägheit nennt.

7 **Ursache. Wesen. Hypothese.** Die Aufgabe der Physik finden wir jetzt dahin erweitert, daß neben der Erscheinung und ihren Bedingungen auch die gesetzmäßigen Größenverhältnisse derselben erforscht werden müssen. Wenn nun auch die Erkenntniß dieser Gesetzmäßigkeit hohe Freude und nebenbei großen Nutzen in der Anwendung der Naturerscheinungen gewährt, so ist doch der Drang nach Enthüllung der Naturgeheimnisse so groß, daß man auch nach den Ursachen der Erscheinungen und der Gesetze derselben geforscht hat, sowie nach der Art, wie die Ursache in einem Körper die Erscheinung hervorruft, also nach dem inneren Vorgange, dem Wesen der Erscheinung. Außerdem trachtet man danach, die vielen Ursachen der verschiedenen Erscheinungen auf eine oder wenige Grundursachen zurückzuführen. — Aus dem Wesen einer Ursache und dem Wesen eines Körpers den inneren Vorgang, also das Wesen einer Erscheinung und ihre gesetzmäßigen Größenverhältnisse auffinden, heißt eine Erscheinung erklären. Häufig reicht schon die Kenntniß einer oder einiger Haupteigenschaften der Ursache und des Körpers zur Erklärung der Erscheinung aus. So werden die Bewegungen der Körper im Ganzen, wie der freie Fall, der Wurf, die Kreisbewegung der Himmelskörper u. s. w., durch die allgemeine Anziehung aller Körper und die Trägheit derselben erklärt. In vielen Fällen ist aber die Wirkung einer Ursache so sehr mit dem inneren Wesen derselben verschmolzen, daß man nur dann eine befriedigende Erklärung geben kann, wenn man das Wesen der Ursache und das Wesen des Körpers kennt, auf den die Ursache wirkt. Da indessen das Wesen der Dinge der directen sinnlichen Erfahrung nicht zugänglich ist, so muß man über das Wesen der Ursachen und der Körper Vermuthungen oder Hypothesen aufstellen, um mittels derselben die Erscheinungen erklären zu können, und um in die bunte Mannigfaltigkeit derselben einen inneren Zusammenhang zu bringen, der nicht nur das Erlernen, sondern auch das Erforschen erleichtert. In manchen Fällen ist sogar die Ursache einer Erscheinung nicht mehr wahrzunehmen und muß dann ebenfalls vermuthungsweise angenommen werden. Hypothesen sind also Vermuthungen über die Ursachen der Erscheinungen. Eine Hypothese gewinnt um so mehr an Wahrscheinlichkeit, je leichter und einfacher sich alle betreffenden Erscheinungen mittels derselben erklären lassen; sie kommt der Gewißheit nahe, wenn sich aus ihr neue, vorher unbekannte Erscheinungen ableiten lassen, und wenn dieselben dann bei der Anstellung des Versuches sowohl der Art, als besonders der Größe nach so eintreffen, wie sie aus der Hypothese abgeleitet wurden. Die Hypothese fällt und verliert jeden Werth, wenn irgend eine neu entdeckte Erscheinung sich durch sie nicht erklären läßt oder ihr gar widerspricht.

Newton stellte zur Erklärung der Lichterscheinungen die Hypothese auf, das Licht sei ein höchst feiner, unwägbarer, allen leuchtenden Körpern entströmender Stoff. Huyghens dagegen suchte nicht lange nach ihm die Anschauung durchzuführen, daß das Licht eine unendlich feine zitternde Bewegung eines Alles durchdringenden ätherischen Stoffes sei. Der große Name Newtons und die Einfachheit seiner Hypothese verhalfen derselben für länger als ein Jahrhundert zum Siege, bis endlich die Entdeckung der Interferenzerscheinungen ihren Sturz herbeiführte. Diese Erscheinungen bestehen nämlich darin, daß Licht zu Licht gebracht wird, und daß hierbei Dunkelheit erzeugt werden kann. Dies wäre ganz undenkbar, wenn das Licht ein Stoff wäre, läßt sich aber leicht erklären, wenn dasselbe eine Bewegung ist, weil Bewegungen einander aufheben können. Die Anschauung von Huyghens erhielt hierdurch ein bedeutendes Uebergewicht. Kein Physiker zweifelt jetzt mehr an der Wahrheit derselben; denn es wurden aus ihr auf mathematischem Wege Erscheinungen gefolgert, die, vorher ganz unbekannt, bei entsprechend angestellten Beobachtungen sich als vollkommen vorhanden ergaben. — Auch für die Wärme bestand bis in unsere Zeit die Meinung, daß sie ein außerordentlich feiner, Alles durchdringender Stoff sei. Nun hat man aber auch für die Wärme Interferenzerscheinungen nachgewiesen. Außerdem wurde gezeigt, daß man aus einem Körper durch Schlagen, Stoßen, Reiben u. s. w. eine unbegrenzte Wärmemenge entwickeln könne, ohne an dem Körper den geringsten Gewichtsverlust wahrzunehmen. Es ist aber schon undenkbar, daß ein begrenzter Körper eine unbegrenzte Stoffmenge verlieren könne; noch weniger scheint dies ohne Gewichtsverlust möglich. Deßhalb ist die ältere Anschauung über das Wesen der Wärme verlassen worden, und die Hypothese, die Wärme sei eine außerordentlich feine Bewegung der Körpertheilchen, hat die Oberhand gewonnen. Da man aus dieser Theorie unbekannte Erscheinungen sowohl der Art wie der Größe nach abgeleitet hat, wie z. B. die Erniedrigung des Schmelzpunktes des Eises durch Druck, so zweifelt man nicht mehr an der Wahrheit derselben. — Für den Schall zeigt uns der erste Blick auf eine tönende Saite, daß derselbe in einer schwingenden Bewegung der schallenden Körper zu suchen ist, und manche Analogien geben der Vermuthung Raum, daß auch die Elektricität und der Magnetismus ihren Grund in eigens gearteten Bewegungen haben. Die meisten anderen Naturerscheinungen sind nichts, als Bewegungen ganzer Körper oder ihrer Theile, und wo uns eine Erscheinung vollkommen den Character der Ruhe zu haben scheint, da sieht das mathematisch geschärfte Auge des Physikers doch den Grund in irgend einer Bewegung. — So erscheinen der modernen Physik alle Zustandänderungen als Bewegungen ganzer Körper, oder ihrer Theile, oder als Bewegungen der kleinsten Theilchen.

Die Aufgabe der Physik kann sonach jetzt vollständiger gefaßt werden: die Physik ist die Wissenschaft von den Bewegungen, welche Zustandänderungen der Körper erzeugen, von den Gesetzen, nach welchen diese Erscheinungen erfolgen, und von den Ursachen, welche die Erscheinungen und die Gesetze derselben bedingen.

Das Verfahren der Physik.

Beobachtung. Apparate. Wie in der Aufgabe der Physik, so lassen sich auch in dem Verfahren derselben drei Stufen unterscheiden. Die erste Stufe ist die Beobachtung der Erscheinung. Genau und rein muß die Zustandänderung, welche die Erscheinung bildet, erfaßt und ausgedrückt werden, alle Körper, welche mit dem sich verändernden Körper in Verbindung oder Beziehung stehen, alle Einflüsse, die auf denselben wirken können, müssen auf das Genaueste und in allen ihren Verhältnissen, der Art und Größe nach, erkannt werden. Zur Schärfung der Beobachtung dienen häufig Instrumente. 8

Die menschlichen Sinneswerkzeuge sind nämlich nur zur unmittelbaren Wahrnehmung dessen geschickt, was mit der menschlichen Größe nicht in all zu schroffem Gegensatze steht. Das Uebergroße, wie das Ueberferne kann unser Blick ebenso wenig umfassen, als er das Ueberkleine und das höchst fein Verdünnte zu erkennen vermag. Deßhalb führt uns das Mikroskop in die Welt des Kleinen, das Teleskop und das Fernrohr eröffnen uns ferne Welten, das Spectralrohr läßt uns unendlich fernen, leuchtenden Stoff erkennen und macht uns fähig, sonst unsichtbare Luftarten mit dem Blicke zu unterscheiden und selbst die unmerklichsten Spuren des verdünntesten Stoffes wahrzunehmen, Töplers Schlierenrohr macht uns die feinsten Aenderungen der Dichtigkeit durchsichtiger Stoffe, wie z. B. die Schallwellen in der Luft sichtbar, der Resonator hebt aus einem Gemische von Tönen einen ein-

zelnen mächtig heraus, der Augenspiegel und der Kehlkopfspiegel lassen uns in das Innere der Sinnesorgane blicken u. s. w. Allein auch die besten Instrumente gehen nicht über gewisse Grenzen hinaus; die Beobachtung ist hierdurch beschränkt. — Noch mehr Schwierigkeiten stellen sich der zuverlässigen Beobachtung durch die Schwäche und Wandelbarkeit der menschlichen Natur entgegen. Tritt der Beobachter mit vorgefaßten Meinungen über das Wesen einer Erscheinung an dieselbe heran, so wird die Klarheit seines Blickes gestört sein, die Schärfe der Beobachtung wird leiden. Oft wird dann die Erscheinung falsch aufgefaßt, ja sogar Unmögliches oder gar nicht Vorhandenes gesehen werden. So hatten die Beobachter des Mittelalters die vorgefaßte Meinung, daß die Lehren des Alterthums unumstößliche Wahrheit seien; sie suchten daher und fanden folglich auch in der Natur nur Bestätigungen jener Lehren. Trotz des Fleißes der Alchymisten wurde daher die Wissenschaft nur wenig gefördert, aber Goldmacherei, Sterndeuterei, Hexenaberglaube u. s. w. waren die Folgen befangener Beobachtung. Auch in unserer Zeit mußten die Tische tanzen und durch Geisterklopfen Geheimnisse offenbaren, weil man mit der vorgefaßten Meinung zu Werke ging, daß die Berührung der Hände verborgene Kräfte erwecken könne. Reinheit und Unbefangenheit des Sinnes sind also Vorbedingung, Schärfe und Genauigkeit das Haupterforderniß einer Beobachtung. Zur Erzielung der letzteren Eigenschaften ist ein längeres Studium der Naturgeschichte, besonders der Botanik, zu empfehlen.

Ist eine Erscheinung beobachtet, so muß der Physiker untersuchen, ob dieselbe wirklich den vermutheten Einflüssen zu verdanken war. Dies geschieht dadurch, daß er die Erscheinung in größerem oder kleinerem Maßstabe, befreit von Nebendingen, nachzuahmen sucht. Der Physiker muß also Versuche machen, Experimente anstellen, experimentiren; hierzu bedarf er der physikalischen Apparate.

Die Experimentirkunst, welche die Körper den verschiedensten Einflüssen unter allen nur denkbaren Verhältnissen aussetzt, erkennt hierdurch nicht blos die Erscheinungen schärfer, sondern erfindet oder entdeckt auch viele neue Erscheinungen, die oft in überraschender Weise früher ganz dunkel gebliebene Phänomene aufklären oder ganz unbekannte Ursachen zu Tage fördern. Sie darf sich aber nicht die Aufgabe stellen, irgend ein Ziel zu erreichen oder Nutzen zu stiften. Die Natur zu erforschen, muß ihr einziger Zweck sein; der practische Nutzen ergibt sich nebenbei oder folgt erst viel später. Wer hätte wohl bei den ältesten elektrischen Versuchen schon an die Erkenntniß des Gewitters, an den elektrischen Telegraphen oder daran gedacht, daß die elektrische Kraft die ganze Natur durchdringe? So mag auch Manches jetzt als Spiel erscheinen, was später der ganzen Menschheit Erkenntniß oder Nutzen gewähren kann. Schon allein das Ersinnen physikalischer Apparate, das Anstellen der Experimente hat die Summe des der Menschheit innewohnenden mechanischen Talentes so entwickelt, daß neue Erfindungen jetzt etwas Alltägliches sind.

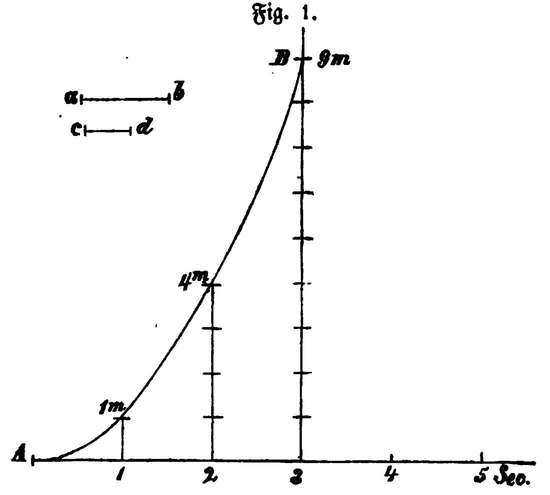
9. Die zweite und wichtigste Stufe in dem Verfahren der Physik ist die Ermittelung der Gesetze. Zu dem Ende müssen alle Größen, die mit der Erscheinung verknüpft sind, genau gemessen, und muß die Art der Abhängigkeit dieser Größen von einander festgestellt werden. Sodann muß man die Erscheinung unter den verschiedensten Umständen hervorrufen und in allen Fällen dieselben Größen messen. Ergibt sich nun, daß die anfänglich gefundene Art der Abhängigkeit unter allen Umständen dieselbe bleibt, so ist mit dem Ausspruche jener Abhängigkeit das Gesetz gefunden.

Hat man z. B. Lichtstrahlen unter den verschiedensten Winkeln auf eine glatte Fläche fallen lassen und durch Messung gefunden, daß in allen Fällen der Winkel, unter welchem die Strahlen zurückgeworfen werden, gerade so groß ist als der Winkel, unter welchem die Strahlen eintreffen, so darf man das Gesetz aufstellen: der Winkel der zurückgeworfenen Strahlen ist gleich dem Winkel der einfallenden Strahlen. — Läßt man eine kleine Bleikugel aus verschiedenen Höhen herabfallen, so findet man, daß sie auf dem Boden anlangt nach 1, 2, 3, 4, 5 Secunden aus einer Höhe von 5, 20, 45, 80, 125 Meter, daß also Fallräume von 5, 20, 45, 80, 125 Metern durchlaufen werden bezüglich in den Fallzeiten von 1, 2, 3, 4, 5 Secunden. Scheidet man aus den Fallräumen den Factor 5 aus, so nehmen dieselben die Form an: 1 . 5, 4 . 5, 9 . 5, 16 . 5, 25 . 5. Es ist leicht ersichtlich, daß die übrigen Factoren sich verhalten wie die Quadrate von 1, 2, 3, 4, 5, also wie die Quadrate der Fallzeiten. Demnach gilt das Gesetz: die Fallräume verhalten sich zu einander wie die Quadrate der Fallzeiten.

Ist die Abhängigkeit bei jedem folgenden Versuche eine andere, so folgt daraus, daß dieselbe überhaupt keine einfache ist; die eine Größe ist dann, wie die Mathematik sagt, eine verwickelte Function der anderen. Die höhere Mathematik, welche ja eigentlich die Wissenschaft der Functionen ist, gibt häufig Mittel an die Hand, für die gesuchte Abhängigkeit einen mathematischen Ausdruck, eine Formel zu finden, welche sich alsdann oft auch in einfachen Sätzen wörtlich aussprechen läßt. Ein solches Mittel ist z. B. die räumliche oder **graphische Darstellung** der gefundenen Größen und die sodann erfolgende Untersuchung der gewonnenen Form nach den Regeln der analytischen Geometrie.

Denkt man sich zum Beispiel 1 Secunde durch eine gewisse Strecke ab (Fig. 1) und 1 Meter durch eine andere Strecke cd dargestellt, trägt man sodann die Secunden auf eine wagrechte Achse, die zugehörigen Fallräume aber auf senkrechte von den Endpunkten der Sekundenstrecken ausgehende Gerade und verbindet man endlich die Endpunkte dieser Senkrechten, so erhält man die Curve AB, eine Darstellung der Abhängigkeit der Fallräume von den Fallzeiten. Ergibt sich nun bei näherer Untersuchung, daß diese Curve eine Parabel ist, so gelten die Gesetze dieser Linie auch für die Fallräume, woraus man das schon angeführte Fallgesetz abermals finden kann.

Fig. 1.



Indessen gibt es auch Fälle, wo selbst die höhere Mathematik noch nicht im Stande war, die Abhängigkeit zahlreicher Versuchsresultate von den zu Grunde liegenden Umständen zu finden. So hat man z. B. noch nicht ermittelt, in welchem gesetzmäßigen Zusammenhange die Spannung des Wasserdampfes mit der Temperatur desselben steht, trotzdem zahllose Versuche angestellt und alle Mittel der Mathematik auf die Resultate derselben angewandt wurden.

In manchen Fällen zeigen verschiedene Erscheinungen eine gewisse Uebereinstimmung, und ihre Gesetze deuten auf einen inneren Zusammenhang. Diese Gesetze sind dann gewöhnlich nur Ausflüsse eines höheren Grundgesetzes, für dessen Auffindung kein bestimmtes Verfahren angegeben werden kann. Solche Grundgesetze werden auch nur von den tiefsten Geistern aufgefunden, deren Namen durch die Gesetze verewigt werden. Solche Grundgesetze sind Ausdrücke für die Grundeigenschaften aller Körper und sind eines der höchsten Ziele der Physik; denn sie ermöglichen die dritte Stufe des physikalischen Verfahrens, die Erklärung der Naturerscheinungen.

Der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen dem Fallen der Körper auf der Erde und der Bewegung des Mondes um die Erde; das Gesetz von der elliptischen Bahn der Planeten, Kometen, der Doppelsterne, wahrscheinlich auch aller Fixsterne; das Gesetz, wonach ein Weltkörper sich um so rascher bewegt, je näher er an seinem Centralkörper ist; das Gesetz, daß auch bei verschiedenen Planeten die Geschwindigkeit in genauer Beziehung steht zu dem Abstande der Planeten von der Sonne; das Gesetz, nach welchem die Umlaufzeit und der Abstand zweier Planeten von der Sonne in höchst einfachem Zusammenhange stehen; die gesetzmäßige Einwirkung verschiedener Planeten auf einander, wonach dieselben sich gegenseitig ein wenig aus ihren reinen Bahnen herauslenken; das Gesetz, welches Ebbe

und Fluth leitet, und noch eine Reihe von Gesetzen und gesetzmäßigen Wirkungen können mathematisch als Ausflüsse eines physikalischen Grundgesetzes nachgewiesen werden, des Newton'schen Gravitationsgesetzes, daß nämlich die Massen eine annähernde Wirkung auf einander ausüben, welche im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernungen steht. — Es ist bekannt, daß durch Reibung Wärme entsteht: Wagenachsen erhitzen sich bis zum Anschmelzen; durch Aneinanderreiben zweier Holzstücke erzeugen wilde Völker Feuer, wie wir unsere Streichhölzchen durch Reiben entzünden. In neuerer Zeit hat man nachgeforscht, wie groß die Anstrengung sein muß, oder welche Arbeit beim Reiben geleistet werden muß, um eine bestimmte Menge von Wärme zu erzeugen. Man erwärmte Wasser durch Schütteln, man ließ metallene Arme durch Wasser und Quecksilber schlagen, man ließ einen stumpfen Meißel auf dem Boden eines mit Wasser gefüllten Kanonenrohres sich reibend herumdrehen. Immer zeigte sich dabei, daß durch Anwendung einer bestimmten Arbeit eine bestimmte Wärmemenge und durch Anwendung derselben Arbeit immer dieselbe Wärmemenge erzeugt wird. Auch durch Stoß entsteht Wärme; das Feuerschlagen mit Stahl und Stein; Schmiede können Nägel bis zum Glühen hämmern; Rammklötze werden heiß. Durch Anstellung genauerer Versuche hat man gefunden, daß auch beim Stoße durch Anwendung derselben Arbeit dieselbe Wärmemenge wie bei der Reibung erzeugt wird. Dasselbe Resultat ergaben auch Versuche, durch Zusammenpressen Wärme zu erzeugen: Eis schmilzt, wenn man es zusammendrückt; preßt man abgeschlossene Luft zusammen, so kann man durch die entstandene Hitze Zunder entzünden. — Umgekehrt wird durch Wärme Arbeit geleistet: die Dampfmaschine, die calorische Maschine werden durch die Wärme in Bewegung gesetzt; die Sonnenwärme bewegt die Luft und treibt dadurch Windmühlen und Segelschiffe; die Sonnenwärme verdunstet das Wasser und erhebt es dadurch, wonach es wieder herabfallend Mühlen aller Art treibt. Auch hier hat die Rechnung ergeben, daß durch Verwendung einer bestimmten Wärmemenge eine bestimmte Arbeit hervorgebracht wird, durch welche man wieder die ursprüngliche Wärmemenge erhalten könnte, wenn man die Arbeit etwa zu Reibung verwenden würde. So wie also Arbeit als solche verloren geht, wird sie in Wärme verwandelt; umgekehrt, wenn durch Wärme Arbeit geleistet wird, wird diese Wärme verzehrt, also in Arbeit verwandelt, und zwar geschehen diese zwei Verwandlungen unter allen Umständen in demselben Mengenverhältnisse. Wärme und Arbeit sind in bestimmter Menge in einander umwandelbar, sie sind in bestimmter Menge einander gleichgeltend. Dieser Satz von der Gleichwerthigkeit oder Aequivalenz von Wärme und Arbeit ist ein physikalisches Grundgesetz.

10 Die dritte Stufe in dem Verfahren der Physik ist die Ermittelung der Ursachen der Erscheinungen und die Zurückführung aller Ursachen auf eine oder wenige Grundursachen. Die Ursachen der Erscheinungen liegen eines Theils in den Eigenschaften des Körpers, der die Erscheinungen zeigt, anderen Theils in den Einwirkungen anderer Körper auf den ersten. Da nun die Erfahrung zeigt, daß ein Körper für sich allein keine Veränderung an sich selbst vornehmen kann, so sind die eigentlich wirksamen Ursachen in den Einwirkungen anderer Körper zu suchen. Diese Fähigkeit eines Körpers, auf einen anderen verändernd einzuwirken, nennen wir Kraft. Diese Fähigkeit eines Körpers kann nur in seinen Eigenschaften liegen.*) Wenn man daher auf der zweiten Stufe zu Grundgesetzen durchgedrungen ist und dadurch Grundeigenschaften der Körper aufgefunden hat, so ist man auch an die Erkenntniß der Kräfte herangetreten und kann häufig einen Rückschluß auf das Wesen derselben aus den Grundgesetzen der Erscheinungen und aus den Grundeigenschaften der Körper ziehen.

Nach dem Newton'schen Gravitationsgesetze üben alle Körper eine annähernde Wirkung auf einander aus. Betrachtet man noch dazu den Zusammenhang der Theilchen eines Körpers, das Anhaften eines Körpers an einem anderen, die innere Festigkeit der chemischen Verbindungen, das Fallen der Körper zur Erde, so wird man zu dem Rückschlusse geführt, daß sowohl die Körper im Ganzen als auch die einzelnen Theilchen derselben eine anziehende Kraft auf einander ausüben. Diese Kraft wird als eine Grundursache der Erscheinungen, als eine Grundeigenschaft des Körperstoffes angesehen. Allerdings würde die Physik noch

*) Um irrthümlichen oder absichtlichen Mißdeutungen vorzubeugen, sei hier sogleich bemerkt, daß man unter Kraft nicht blos die Fähigkeit oder das Bestreben eines Körpers, auf einen anderen verändernd einzuwirken, versteht, sondern auch den Druck oder Zug, welcher hierbei zwischen den beiden Körpern stattfindet, ja auch sogar diesen Druck oder Zug verbunden mit der vorgegangenen Veränderung oder Bewegung.

einen wesentlichen Fortschritt machen, wenn sie das Wesen dieser Kraft, den Grund ihrer Wirkungsart erklären könnte, wie es z. B. bei der Wärme der Fall ist. Das Wesen der Wärme sah man früher in der Abstoßung eines eigenen Stoffes, des Wärmestoffes. Jetzt hat man aber aus dem Satze über die Aequivalenz von Wärme und Arbeit einen Rückschluß auf das Wesen der Wärme gezogen. Man sagte: Da die Arbeit nur eine Körperbewegung ist, so muß auch die der Arbeit gleichwerthige Wärme, welche jeden Augenblick aus Arbeit entstehen und in dieselbe übergehen kann, eine Körperbewegung sein; eine fortschreitende oder drehende oder zitternde Bewegung der ganzen Körper ist sie, wie der Augenschein lehrt, nicht; also kann die Wärme nur in einer den Sinnen entgehenden, unendlich feinen Bewegung der Körpertheilchen bestehen. — Für die Richtigkeit dieser Hypothese sprechen noch zwei früher schon angeführte Gründe. — In der eben angeführten Schlußweise ist man in unserer Zeit noch weiter gegangen. Auch andere Kräfte, wie z. B. die chemische Verwandtschaft, die Elektricität lassen sich in Massenbewegung oder in Wärme umsetzen. Man glaubt daher auch das Wesen dieser, ja aller Kräfte in einer eigens gearteten, noch ganz unbekannten Bewegung kleinster Theilchen sehen zu dürfen. So liegt z. B. die Vermuthung nahe, daß die Anziehung der Körper von dem Drucke des Weltäthers, von dem Stoße der Aetheratome herrühre. Wenn wirklich einmal alle Kräfte als Stoffbewegungen erkannt sein werden, so wird der innere Zusammenhang derselben, die Verwandlung einer Kraft in eine andere, leicht begreiflich und erklärlich sein. Alle Naturerscheinungen werden dann nur Bewegungsverwandlungen sein, und die Ursachen dieser Verwandlungen wird man nur in den Bewegungszuständen der auf einander einwirkenden Körper zu suchen haben. Die höchsten Resultate aller physikalischen Forschungen werden dann mit einigen Axiomen, einigen allgemeinen Grundsätzen übereinstimmen, mit den Sätzen: „Alle Ursachen sind Bewegungsursachen" und „Kräfte d. i. Bewegungen können wohl verwandelt, aber nicht vernichtet werden." Auf diesen Axiomen wird sich dann das ganze Lehrgebäude der Physik erheben. Doch sind wir noch weit von diesem Ziele entfernt.

Induction. Deduction. Das beschriebene Verfahren der Physik, von den Resultaten der Beobachtung auf die Gesetze, und von diesen auf die Ursachen zu schließen, und dadurch in das Wesen der Erscheinungen eingeführt zu werden, nennt man Induction. Die Richtigkeit des durch Induction gefundenen Resultates bewährt sich, wenn es gelingt, das umgekehrte Verfahren einzuschlagen, d. h. die Erscheinung aus ihren Ursachen abzuleiten. Dieses Verfahren nennt man Deduction. Es ist das eigentliche Ideal der Physik, in allen Gebieten, sowohl im Einzelnen, als auch im Ganzen, den Weg der Deduction einzuschlagen, und endlich das ganze Lehrgebäude auf dem Fundamente einiger Grundbegriffe, ähnlich wie in der Mathematik, zu erheben. Damit nur einstweilen der erste Theil dieses Ideales erreichbar schiene, müßte man die innere Bildung des Stoffes im Allgemeinen und den Grund der Stoffunterschiede kennen; außerdem müßte man über das Wesen der Kräfte im Klaren sein. Dann könnte man ableiten, wie sich ein bestimmter Körper unter der Einwirkung bestimmter Kräfte verändern müßte. Eine solche Ableitung wäre die vollständige Erklärung der Erscheinungen. Da man indessen noch nicht das Wesen aller Kräfte kennt, so geht man auch von Grundeigenschaften der Kräfte und Körper aus, und leitet aus diesen die Erscheinungen ab. — Doch ist die blose Worterklärung nicht ausreichend; denn bei jeder Erscheinung treten Größen auf, welche ebenfalls durch die Deduction gefunden werden müssen; daher ist die einzig unanfechtbare Erklärung der Naturerscheinungen die mathematische Deduction derselben. 11

Da in einem „Lehrbuch für höhere Schulen" die höhere Mathematik nicht vorausgesetzt werden kann, und da diese häufig allein ausreicht zur mathematischen Deduction, so sind diesem Lehrbuche mancherlei Schranken gezogen. Außerdem ist das Wesen mancher Kräfte, wie z. B. der Elektricität und des Magnetismus noch unbekannt; für diese beiden Kräfte muß also jedenfalls der Weg der Induction beibehalten werden. Dagegen für die übrigen Gebiete der Physik, für die Lehre vom Schalle, vom Lichte und von der Wärme, sowie für die Bewegungserscheinungen der ganzen Körper ist in diesem Buche, so viel als bis jetzt möglich, der Weg der Deduction eingeschlagen worden. Doch muß der mathematischen oder logischen Ableitung eines Satzes immer der experimentelle Nachweis zur Seite stehen.

12 **Eintheilung der Physik.** Nach den Annahmen der neueren Physik sind alle physikalischen Erscheinungen oder Zustandänderungen entweder Bewegungen ganzer Körper oder Bewegungen der kleinsten Körpertheilchen oder Moleküle; folglich theilen wir die Physik in die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik und in die Lehre von der Molekularbewegung oder die engere Physik. Dem ersten Theile muß eine Einleitung voraus gehen, in welcher allgemeine Begriffe und Sätze festgestellt und die Principien der Mechanik entwickelt werden, welche jetzt eigentlich die Principien der ganzen Physik geworden sind. Der erste Theil selbst zerfällt in 3 Abtheilungen: 1. Die Mechanik der festen Körper oder allgemeine Mechanik; denn viele der hier entwickelten Gesetze gelten auch für die flüssigen und luftförmigen Körper, sowie für die kleinsten Theilchen. 2. Die Mechanik der flüssigen Körper oder Hydromechanik (Hydraulik). 3. Die Mechanik der luftförmigen Körper oder Aëromechanik (Pneumatik). — Der zweite Theil zerfällt in 6 Abtheilungen: 1. Die Wellenlehre oder die allgemeine Lehre von der Molekularbewegung. 2. Die Lehre von dem Schalle oder die Akustik. 3. Die Lehre vom Lichte oder die Optik. 4. Die Lehre von der Wärme oder Calorik. 5. Die Lehre von dem Magnetismus. 6. Die Lehre von der Elektricität. Die beiden letzten Kräfte sind zwar noch nicht als Bewegungen der kleinsten Theilchen erkannt, stehen aber mit den drei vorausgehenden Abtheilungen in so vielfachem Zusammenhange, daß sie ebenfalls in die Lehre von der Molekularbewegung gehören.

Früher theilte man die Physik in die Lehre von den unwägbaren Dingen oder Imponderabilien, zu welchen das Licht, die Wärme u. s. w. gerechnet wurden, und in die Lehre von den wägbaren Dingen oder Ponderabilien. Die Physik des Wägbaren zerfiel in die Statik und die Dynamik; die erstere betrachtete die Körper im Zustande der Ruhe, die letztere im Zustande der Bewegung. Man unterschied weiter die Statik der festen Körper (Geostatik) von der Statik der flüssigen Körper (Hydrostatik) und von der Statik der luftförmigen Körper (Aërostatik); ebenso unterschied man Geodynamik, die Lehre von der Bewegung der festen Körper, Hydrodynamik, die Lehre von der Bewegung der flüssigen Körper, und Aërodynamik, die Lehre von der Bewegung der luftförmigen Körper. Diese sechs Wissenschaften bilden für sich die große und wichtige Wissenschaft der Mechanik, welche ein eigenes Studium verlangt, und von welcher in der Physik nur die wichtigsten Sätze vorgetragen werden können. Aus diesem letzten Grunde schon erscheint die Eintheilung in Statik und Dynamik für ein kleineres Lehrbuch der Physik nicht geeignet: doch ist dieselbe auch in den meisten größeren Lehrbüchern verlassen worden, weil die Ruhe nur scheinbar ist oder als Resultat entgegengesetzter Bewegungen betrachtet werden muß, und weil demnach die Ruhe als ein specieller Fall der Bewegung angesehen werden kann. Außerdem hat man als Ursache der Ruhe das Gleichgewicht der auf einer Körper wirkenden Kräfte erkannt und daher die Lehre vom Gleichgewichte ebenfalls mit dem Worte Statik bezeichnet. Man hatte dabei übersehen, daß ein Gleichgewicht der Kräfte nicht blos an ruhenden Körpern vorkommt, sondern auch an solchen bewegten Körpern, die ihre Bewegung unverändert fortsetzen, und daß gerade dieses Gleichgewicht an bewegten Körpern die wesentlichste Aufgabe der theoretischen und practischen Mechanik bildet. Die Lehre vom Gleichgewichte oder die Statik gehört daher nicht blos zu der Lehre von den ruhenden Körpern, zu der Statik, sondern auch zu der Lehre von den bewegten Körpern, zu der Dynamik, sie ist der wesentlichste Theil der ganzen Mechanik.

Einleitung.

1. Allgemeine Begriffe.

1. Der Raum.

Begriff und Messen des Raumes. Keiner der aufgestellten Begriffe des Raumes hat allgemeine Annahme gefunden. Nach der Erfahrung liegt jedoch eine Grundeigenschaft des Raumes darin, daß er sich nach unendlich vielen Richtungen erstreckt, d. h. daß man von einer Stelle desselben unendlich viele verschiedene Wege einschlagen kann. Doch lassen sich alle diese Richtungen aus 3 Hauptrichtungen oder Dimensionen zusammensetzen: vor uns hin (Länge), vor uns auf (Höhe oder Tiefe) und von uns weg (Breite oder Dicke). Der Raum hat also drei Dimensionen. 13

Die Physik muß den Weltraum zwar für unbegrenzt oder unendlich annehmen, zieht jedoch nur den begrenzten Raum und den ausgefüllten Raum in den Kreis ihrer Betrachtung. Ein ausgefüllter Raum wird physikalischer Körper, ein blos begrenzter Raum geometrischer Körper genannt. Die Grenzen eines Körpers sind die Flächen, d. h. solche Raumformen, welche nur 2 Dimensionen haben; die Grenzen der Flächen sind die Linien, d. h. solche Raumformen, welche nur 1 Dimension haben; die Grenzen der Linien sind die Punkte, d. h. solche Raumformen, die keine Dimension haben.

Wie alles Messen nur ein Vergleichen ist, so wird auch die Größe eines Raumes gemessen, indem man denselben mit einem anderen Raume vergleicht, der gesetzlich als Raumeinheit aufgestellt worden ist. Ebenso vergleicht man begrenzte Flächen und Linien mit der Flächen-Einheit und der Längen-Einheit. Der Punkt hat keine Größe, weil er keine Dimension hat.

Die Längen-Einheit hat man früher von dem menschlichen Körper genommen: Fuß und Elle sind auch jetzt noch vielfach verbreitete Längenmaße, sind aber in verschiedenen Ländern sehr verschieden und stimmen auch nicht mit der durchschnittlichen Größe des menschlichen Fußes und Vorderarmes überein. In dem Bestreben, eine unveränderliche und unverlierbare Grundlage des Längenmaßes, ein „Naturmaß" zu gewinnen, nahm man bei der allgemeinen Veränderung aller staatlichen Verhältnisse in der französischen Revolution die Erde als Fundament des Maßes an. Denn, wenn die Erde sich auch durch allmälige Abkühlung unseres Sonnensystems ändern sollte, so ist doch wenigstens seit 2000 Jahren eine merkliche Aenderung der Größe derselben nicht eingetreten. Es wurde daher das neue Längenmaß, das Meter, von der Erde genommen. Das Meter ist der 10-millionte Theil des Meridianquadranten der Pariser Sternwarte.

Durch astronomische Beobachtung konnte man finden, wieviele Grade oder 360stel des Meridians der Erdbogen zwischen der Insel Formentera (Pityusen) und Dünkirchen enthält; die Entfernung dieser Orte wurde auf das Genaueste gemessen. Aus derselben konnte man dann die Länge von 90° oder des ganzen Quadranten und daraus die Länge

des 10-millionten Theiles desselben berechnen. — Zwar hat sich später herausgestellt, daß der genannte Quadrant = 10 000 856 Meter ist; allein dieses Maß hat in der Wissenschaft die weiteste Verbreitung, bietet in der Rechnung, wie im Leben große Vortheile und wurde daher sowohl von Seiten der Wissenschaft als auch von volkswirthschaftlichen Congressen und staatlichen Maß-Commissionen zur allgemeinen Einführung empfohlen; so ist dasselbe denn auch im deutschen Reiche 1871 und in verschiedenen Staaten, wie auch in den englischen Colonien eingeführt worden, wodurch es von allen Maßen die weiteste Verbreitung auf der Erde gefunden hat. Auch in England wird die Einführung vorbereitet; dort ist seit 1824 die Länge des Secundenpendels = 0,9933^m als standard-yard dem Längenmaße zu Grunde gelegt. In diesem Buche wird das Metermaß durchgängig angewendet; mittels der unten folgenden Vergleichtafel ist dasselbe leicht in jedes andere Maß zu verwandeln.

Eintheilung des Meters.

1 Meter	= 10 Decimeter	= 100 Centimeter	= 1000 Millimeter.
	1 "	= 10 "	= 100 "
		1 "	= 10 "

Eine von dem Reichskanzleramt zusammenberufene Commission zur Feststellung abgekürzter Maß- und Gewichtsbezeichnungen hat am 17. Febr. 1877 folgende Vorschläge für die eben angeführten Längeneinheiten gemacht, denen wir uns ebenso wie für die anderen Einheiten in diesem Buche anschließen:

1 Meter = 1^m, 1 Centimeter = 1^{cm}, 1 Millimeter = 1^{mm}; ebenso bezeichnen wir 1 Decimeter mit 1^{dm}. Demnach werden z. B. 7,83 Millimeter geschrieben 7,83^{mm}; jedoch soll es auch freistehen zu schreiben 7,83 mm. Wir ziehen den Satz rechts oben vor, weil in diesem Buche die Zeichen auch mit Buchstaben verbunden vorkommen, wobei die zweite Bezeichnungsweise leichter Irrthümer erzeugen könnte.

Vielfache des Meters sind: 1 Dekameter = 10^m, 1 Hektometer = 100^m, 1 Kilometer (1^{km}) = 1000^m, das Maß für die Entfernung von Städten und Orten, etwas kleiner als eine Viertelwegstunde; 1 Myriameter = 10000^m.

Vergleichtafel des Meter mit anderen Längenmaßen.

Baden:	1^m = 3,333′;	1′ = 300^{mm}	Preußen:	1^m = 3,186′;	1′ = 314^{mm}.
Baiern:	1^m = 3,426′;	1′ = 252^{mm}	Rußland:	1^m = 3,281′;	1′ = 305^{mm}.
Dänemark:	1^m = 3,186′;	1′ = 314^{mm}	Sachsen:	1^m = 3,531′;	1′ = 283^{mm}.
England:	1^m = 3,281′;	1′ = 305^{mm}	Schweden:	1^m = 3,670′;	1′ = 297^{mm}.
Frankreich:	1^m = 3,078′;	1′ = 325^{mm}	Schweiz:	1^m = 3,333′;	1′ = 300^{mm}.
Hessen:	1^m = 4′;	1′ = 250^{mm}	Würtemberg:	1^m = 3,491′;	1′ = 286^{mm}.
Oestreich:	1^m = 3,163′;	1′ = 316^{mm}			

Für größere Entfernungen auf der Erde und für nähere Weltkörper dient noch als Längen-Einheit die geographische Meile (1 M.) = 1/15 von einem Grade des Aequators = 7420^m = 23643′ pr. = 4,611 engl. Meilen. — Für noch größere Entfernungen benutzt man Erdweiten; 1 Erdweite oder die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde = 20 Mill. M. — Die größten Entfernungen, wie den Abstand der Fixsterne von einander gibt man in Jahren Lichtzeit an; 1 Jahr Lichtzeit ist der Weg, den das Licht (40000 M. in 1 Sec.) in 1 Jahre zurücklegt, = 1½ Bill. M. Der nächste Fixstern (α Centauri) ist 3½ Jahre Lichtzeit von uns entfernt, der Stern Alkyone im Siebengestirn 573 Jahre Lichtzeit; Durchmesser des Milchstraßenringes = 7700 Jahre Lichtzeit.

Zur Einheit des Flächenmaßes benutzt man ein solches Quadrat, dessen Seiten eine Längen-Einheit groß sind. Solche Flächen-Einheiten sind: Das Quadratmillimeter = 1^{qmm}, das Quadratcentimeter = 1^{qcm} = 100^{qmm}, das Quadratdecimeter = 1^{qdm} = 100^{qcm} = 10 000^{qmm}, das Quadratmeter = 1^{qm} = 100^{qdm} = 10 000^{qcm} = 1 000 000^{qmm}. Als Feldmaß wird benutzt das Quadratdekameter oder Ar = 1^a = 100^{qm} und das Hektar = 1^{ha} = 100^a. Zur Ausmessung der Länder dient das Quadratkilometer 1^{qkm} = 1 000 000^{qm} = 10 000^a = 100^{ha}.

Als Einheit des Körpermaßes benutzt man einen Würfel (Cubus), dessen Kanten Längen-Einheiten und dessen Seiten daher Flächen-Einheiten sind; ein solcher Würfel wird Cubik-Einheit genannt. Cubik-Einheiten sind: das Cubikcentimeter = 1^{ccm} = 1000^{cmm}, das Cubikdecimeter, als gebräuchliches Hohlmaß Liter benannt = 1^l = 2 hessischen Schoppen, das Hektoliter = 1^{hl} = 100^l, das Cubikmeter = 1^{cbm} = 1000^{cdm} = 1 000 000^{ccm} = 1 000 000 000^{cmm} (1^{cbm} = 64 c′ hess. = 32,34 c′ preußisch)

Der Vollständigkeit wegen mögen hier auch die von der genannten Reichscommission vorgeschlagenen abgekürzten Bezeichnungen der Gewichts-Einheiten folgen: 1 Gramm = 1^g, 1 Kilogramm = 1^{kg} = 1000^g, eine Tonne = 1^t = 1000^{kg}; 1 Milligramm = 1^{mg} =

0,001g. Der Verein deutscher Ingenieure schlägt außerdem noch folgende Abkürzungen vor: 1 Meterkilogramm = 1^{mk}, 1 Pferdestärke (Pferdeeffect) = 1^{e}, 1 Atmosphärendruck = 1^{at}, 1 Calorie = 1^{c}.

Durch Beschluß des Bundesrathes vom 8. Oktober 1877 sind die Vorschläge der genannten Commission zur ausschließlichen Anwendung im amtlichen Verkehr und beim Unterrichte in öffentlichen Lehranstalten verordnet.

Die Geometrie lehrt, wie die Inhalte gesetzmäßig begrenzter Flächen und Körper durch Rechnung gefunden werden. Practisch findet man den Raum eines kleineren Körpers, indem man denselben in ein theilweise mit Wasser gefülltes, graduirtes Gefäß wirft und beobachtet, um wieviele Theilstriche oder Grade das Wasser gestiegen ist. Wenn z. B. das Gefäß nach ccm graduirt ist und das Wasser um 13 Theilstriche steigt, so nimmt der eingeworfene Körper einen Raum von 13^{ccm} ein. Da aber graduirte Gefäße, wenn sie Genauigkeit besitzen sollen, selten andere, als Röhrenform besitzen können, und da man Körper von einiger Größe nicht in Röhren bringen kann, so ist die Methode von Persoz (1865) zu empfehlen. Man bringt den Körper in ein Gefäß von bekanntem Volumen V, das mit einer graduirten Röhre in Verbindung steht; dann füllt man das Gefäß ganz mit einer Flüssigkeit aus, wodurch sämmtliche Luft in die graduirte Röhre gedrängt wird, an welcher man das Volumen v derselben ablesen kann. Das Volumen des Körpers ist gleich demjenigen des Gefäßes, weniger demjenigen der Luft, die durch die Flüssigkeit verdrängt wurde, also = V — v. — Die Volumina pulverförmiger, poröser, schwammiger u. a. distracten Körper findet man mittels des Stereometers oder Volumenometers, s. 205.

2. Die Zeit.

Begriff und Messen der Zeit. Was unter Zeit verstanden wird, läßt sich **14** zwar nicht durch einen Begriff bestimmen, ist aber aus der Erfahrung allgemein bekannt. Wir messen die Zeit, indem wir sie mit einem Zeitraume vergleichen, der allen Menschen bekannt ist und uns von der Natur selber dargeboten wird; am tauglichsten müssen dazu solche Zeiträume erscheinen, in welchen irgend eine regelmäßig wiederkehrende und die irdischen Verhältnisse regierende Bewegung im Bereiche der Natur vollbracht wird. Zum Messen größerer Zeiten bietet sich so von selbst jene Zeit dar, innerhalb deren die Erde ihre Bahn um die Sonne vollendet, oder in welcher sich die Sonne scheinbar um die Erde dreht. Dieser Zeitraum ist das Jahr. Zum Messen der kleinen Zeiten ist derselbe zu lang; dazu ist tauglicher die Zeit, welche die Erde zur Drehung um sich selbst braucht, obwohl wir diese Bewegung selbst nicht wahrnehmen können; denn die aus derselben sich ergebende scheinbare Drehung des ganzen Sternhimmels um die Erde kann deutlich wahrgenommen werden, indem jeder Stern im Osten aufsteigt, einen höchsten Punkt am Himmel erreicht und im Westen wieder herunter geht, um so seinen Kreis ganz in derselben Zeit zu vollenden, in welcher sich die Erde um sich selbst dreht. Man nennt diese Zeit einen Sterntag; er dient in der Astronomie zur Zeitmessung. Hierbei wird der Weg desjenigen Himmelspunktes zu Grunde gelegt, in welchem die Sonne im Augenblicke des Frühlingsanfanges steht, und den man Frühlingspunkt nennt. Hat dieser seine höchste Stelle am Himmel erreicht, so sagen die Astronomen, es sei Null Uhr Sternzeit. Da nun die Bewegung der Erde ganz gleichförmig ist, so braucht auch der Frühlingspunkt zu gleichen Wegen ganz gleiche Zeiten; der 24. Theil seiner Umdrehungszeit wird eine Stunde Sternzeit genannt. Es ist daher 5 Uhr Sternzeit, wenn der Frühlingspunkt um $^{5}/_{24}$ seines Kreises über den höchsten Punkt desselben hinaus ist, es ist 19 Uhr Sternzeit, wenn derselbe $^{19}/_{24}$ seines Weges zurückgelegt hat u. s. w.

An dieser gleichförmigen Drehung aller Gestirne von Osten nach Westen um die Erde nimmt die Sonne zwar auch Theil und bringt dadurch den Unterschied von Nacht und Tag hervor, der allein die Grundlage der bürgerlichen Zeitmessung bilden kann. Aber während die Sonne sich täglich um die Erde nach Westen

dreht, legt sie auch von ihrer jährlichen scheinbaren Bahn um die Erde ein Stück nach Osten, ungefähr $^1/_{365}$ zurück. Wenn sie daher z. B. heute gleichzeitig mit einem gewissen Sterne aufgeht, so ist sie morgen um $^1/_{365}$ östlicher und kann demnach erst etwa 4 Min. später aufgehen. Es ist also der Tag der Sonne um etwa 4 Minuten länger als der Sterntag: die bürgerliche Zeit stimmt nicht mit der astronomischen überein. Außerdem sind die Sonnentage eines Jahres nicht gleich lang, weil die Sonne sich auf ihrer jährlichen Bahn bald schneller, bald langsamer bewegt, so daß sie bald mehr, bald weniger hinter den Sternen zurückbleibt. Und doch sind im bürgerlichen Leben nur gleiche Zeitmaße anwendbar. Man hat daher statt des wirklichen oder wahren Sonnentages für die bürgerliche Zeitmessung den mittleren Sonnentag eingeführt, d. i. einen solchen Zeitraum, welcher so oft genommen, als wahre Sonnentage im Jahre enthalten sind, auch genau die Jahreslänge gibt. Ein solcher mittlerer Sonnentag wird in 24 Stunden getheilt à 60 Minuten à 60 Secunden à 60 Tertien. Diese 24 Stunden werden bei uns in zwei Hälften gezählt, vom Mittage an, der Zeit des höchsten Sonnenstandes, und von Mitternacht an, der Zeit des tiefsten Sonnenstandes. Doch können unsere Uhren meist nicht 12 Uhr zeigen, wenn der wahre Mittag oder die wahre Mitternacht stattfindet. Den täglichen Unterschied zwischen der wahren und der mittleren Sonnenzeit nennt man die Zeitgleichung, von welcher wir eine kleine Tabelle beifügen.

Jan. 1 .. + 4′	Febr. 1 .. + 13′	März 12 .. + 10′	April 10 .. + 1′	Mai 11 .. — 3′
„ 16 .. + 10′	„ 10 .. + 15′	„ 22 .. + 7′	„ 15 ... 0′	„ 20 .. — 4′
	„ 20 .. + 14′		„ 21 .. — 1′	
Juni 10 .. — 1′	Juli 10 .. + 5′	Aug. 9 .. + 5′	Sept. 1 .. 0	Oct. 6 .. — 12′
„ 15 .. 0	„ 20 .. + 6′	„ 19 .. + 3′	„ 8 .. — 2′	„ 20 .. — 15′
„ 20 .. + 1′			„ 28 .. — 9′	
	Nov. 7 .. — 16′	Dec. 16 .. — 4′		
	„ 27 .. — 12′	„ 25 .. 0.		

Eine solche Tabelle wird benutzt, wenn man eine Uhr nach der Sonne stellen will. Man beobachtet den wahren Mittag durch astronomische Mittel und fügt zu demselben die Zeitgleichung des betreffenden Tages; hierdurch erhält man die mittlere Zeit im wahren Mittag, d. i. die Zeit, auf welche die Uhren im Augenblicke des beobachteten wahren Mittags gestellt werden müssen. Wie die Tabelle zeigt, ist die Zeitgleichung gegen Ende des Jahres negativ: im Nov. beträgt sie sogar — 16′, d. h. im wahren Mittag stehen unsere Uhren auf 16′ weniger als Mittag, der wahre Mittag findet $^1/_4$ vor 12 statt; umgekehrt verhält es sich im Februar, wo die Zeitgleichung + 15′ beträgt, wo also der wahre Mittag auf $^1/_4$ nach zwölf Uhr fällt. Die Erklärung für die erste Erscheinung liegt darin, daß die Erde am 2. Juli sich im Aphelium, also in ihrer kleinsten Geschwindigkeit befindet: deßhalb ist zu dieser Zeit auch die scheinbare Bewegung der Sonne am langsamsten, diese eilt auf ihrer täglichen Bahn einem Sterne am wenigsten voraus; der wahre Sonnentag ist nicht viel größer als der Sterntag, er ist kleiner als der mittlere Sonnentag: deßhalb findet der wahre Mittag vor dem mittleren statt. Da sich von jenem Tage an der Unterschied fortwährend vergrößert, so steigert er sich im Nov. bis zu 16 Minuten; um ebenso viel Zeit geht auch die Sonne für uns früher auf und unter, weshalb im November die Morgen heller sind als die Abende. Von dieser Zeit an nähert sich die Erde rasch dem am 1. Jan. eintretenden Perihelium und hiermit ihrer größten Geschwindigkeit; hierdurch wird die scheinbare Bewegung der Sonne zu dieser Zeit am größten, sie eilt einem Sterne am meisten voraus, der wahre Sonnentag übertrifft den Sterntag am meisten, er ist größer wie der mittlere Sonnentag. Im Februar fällt der wahre Mittag 15′ nach 12 Uhr; ebenso geht die Sonne später auf und unter, die Morgen sind dunkler als die Abende.

Ein bequemer und einfacher Apparat, um zu jeder Zeit, wenn die Sonne scheint, die wahre Sonnenzeit und durch Hinzufügung der Zeitgleichung die mittlere Sonnenzeit zu bestimmen, so genau, als dies für bürgerliche Verhältnisse wünschenswerth ist, wird für Jedermann geboten durch das Horoskop von Eble s. 581. (bei Rudolf Engler in Ellwangen zu haben).

3. Ruhe und Bewegung.

15 Ein Körper ist in Ruhe, wenn alle Theile desselben zu verschiedenen Zeiten immer an demselben Raume verharren. Da jeder irdische Körper sich mit der Erde um deren Achse und um die Sonne dreht, auch an der Fortbewegung der Sonne, wahrscheinlich um den Schwerpunkt unseres Sonnenhaufens, Antheil nimmt, so gibt es auf der Erde keinen Körper, der in Ruhe ist. Absolute Ruhe gibt es nicht. Wohl aber kann ein irdischer Körper seinen Ort auf der Erde behalten, also in Beziehung zur Erde in Ruhe sein; demnach gibt es relative Ruhe.

Befindet sich ein Körper in auf einander folgenden Zeiten in verschiedenen Räumen, so ist er in Bewegung. Weil jeder irdische Körper an so vielerlei Bewegungen Theil nimmt, die uns theilweise noch ganz unbekannt sind, und weil außerdem der Raum eines Körpers im Weltraume der Lage nach gar nicht angegeben werden kann, so ist auch die absolute Bewegung eines Körpers im Weltraume unmöglich näher zu bestimmen. Indessen ist auch nur die relative Bewegung für uns von Wichtigkeit, d. i. die Ortsveränderung eines Körpers gegen einen anderen, z. B. gegen die Erde, wobei der andere Körper in Ruhe gedacht wird.

Zur näheren Bestimmung einer Bewegung muß angegeben werden:

1. die Form des Weges, welchen der Körper beschreibt, ob nämlich die Bahn eine gerade oder krumme, und welche krumme Linie sie ist. Sind die Bahnlinien aller Körperpunkte genau dieselben oder identisch, so ist die Bewegung eine fortschreitende; sind die Bahnformen der verschiedenen Punkte des bewegten Körpers nur einander ähnlich, so ist die Bewegung eine drehende, wälzende oder rotirende, eine Rotation; wird eine und dieselbe Bewegung oftmals wiederholt, indem der Körper immer wieder in die ursprüngliche Lage zurückkehrt, so nennt man dies eine schwingende oder vibrirende Bewegung; jede dieser wiederholten Bewegungen mit der zugehörigen Wiederkehr wird eine Schwingung, Vibration, Undulation, Oscillation genannt.

2. die Richtung der Bewegung; sie wird am besten angegeben durch den Winkel, den die Bahn mit irgend einer bekannten Richtung, z. B. der wagrechten (horizontalen) oder der lothrechten (verticalen) Richtung einschließt.

3. die Länge des Weges oder kurz der Weg.

4. die Zeit, welche der Körper für die Bewegung braucht. Zur Zählung der Secunden benutzt man genaue Uhren, Chronometer, in der Physik ein Secunden schlagendes Pendelwerk.

Wenn der Körper in beliebig kleinen gleichen Zeiten gleiche Wege zurücklegt, so nennt man die Bewegung gleichförmig; eine ungleichförmige Bewegung findet statt, wenn der Körper in gleichen Zeiten ungleiche Wege zurücklegt. Werden die Wege in den folgenden gleichen Zeiten immer größer, so ist die Bewegung eine beschleunigte, im entgegengesetzten Falle eine verzögerte. Wenn die Wege in den folgenden gleichen Zeiten immer um gleich viel zunehmen, so nennt man die beschleunigte Bewegung eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; eine gleichförmig verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Wege in den auf einander folgenden Zeiten um gleich viel abnehmen.

Unter den zahlreichen Bewegungen der Weltkörper scheint es nur eine gleichförmige zu geben, nämlich die Drehung der Weltkörper um sich selbst. Wir sehen nämlich jede Bewegung um so rascher sich ändern, je mehr derselben entgegen gewirkt wird; auf losem Sandboden kommt eine geschobene Kegelkugel bald zur Ruhe, auf einer festgestampften Bahn rollt sie weiter, in der Luft fliegt eine abgeschossene Kugel noch weiter. Träte der Bewegung kein Hinderniß entgegen, so würde sie sich gar nicht ändern, sie wäre in diesem Falle gleichförmig; der Drehung der Weltkörper wirkt nichts entgegen *), daher ist sie gleich-

*) Von der in letzter Zeit besprochenen verzögernden Einwirkung von Ebbe und Fluth wollen wir hier schweigen, um die für den Schüler nöthige Klarheit der Entwickelung nicht zu stören.

förmig. Wie eine Bewegung sich nicht ändert, wenn der sich bewegende Körper ausschließlich sich selbst überlassen ist, so ändert sich folgerichtig auch die Ruhe eines Körpers nicht, wenn derselbe keine Einwirkung erfährt. Ein ruhender Körper bleibt also ohne Einwirkung unverändert in Ruhe, ein bewegter Körper ändert ohne Einwirkung seine Bewegung nicht. Es ist dies eine allgemeine Eigenschaft der Körper, die man mit dem Namen Trägheit bezeichnet, und welche Newton als das erste Gesetz der Bewegung oder der Mechanik auffaßt, da sie bei allen Bewegungen den ersten Einfluß besitzt. Wir haben dieselbe später noch genauer zu betrachten. Wenn nun ein Körper an einer ihm mitgetheilten Bewegung aus sich selbst nichts ändern kann, sich vielmehr gegen eine äußere Einwirkung ganz passiv verhält, so muß er auch durch dieselbe Einwirkung immer wieder dieselbe Bewegung erhalten, einerlei ob er in Ruhe oder Bewegung ist. Diese durch zahlreiche Erfahrungen festgestellte und jeden Augenblick leicht zu prüfende Thatsache, daß ein Körper im bewegten Zustande dieselbe Wirkung durch einen äußeren Einfluß erfährt wie im Ruhestande, nennt Newton das zweite Gesetz der Mechanik. Legt hiernach ein Körper durch eine am Beginne eines gewissen Zeitraumes erfolgende Einwirkung in diesem Zeitraume einen gewissen Weg zurück, und ist er am Ende dieses Zeitraumes einer gleichen Einwirkung ausgesetzt, so wird er in dem folgenden gleichen Zeitraume den doppelten Weg zurücklegen, da zu der Bewegung, die er durch die erste Einwirkung erhielt, und die er nach dem Gesetze der Trägheit beibehalten muß, sich am Beginne des zweiten Zeitraumes nach dem zweiten Gesetze eine gleiche Bewegung addirt; ebenso wird er im dritten gleichen Zeitraume den dreifachen Weg zurücklegen, wenn im Beginne desselben sich die schon zweimal erfahrene Einwirkung abermals wiederholt u. s. w. Der Körper wird demnach eine beschleunigte Bewegung annehmen, und zwar eine sprungweise gleichförmig beschleunigte, weil die Wege nach gleichen Zeiten um gleichviel zunehmen. Eine vollkommen gleichförmig beschleunigte Bewegung wird eintreten, wenn dieselbe Einwirkung unaufhörlich stattfindet; umgekehrt, wenn ein Körper eine unaufhörlich beschleunigte Bewegung besitzt, so muß er eine unaufhörliche Einwirkung erfahren. So ist das Fallen der Körper eine beschleunigte und zwar eine gleichförmig beschleunigte Bewegung, die unaufhörlich schneller wird. Wir können hieraus schließen, daß auf einen fallenden Körper unaufhörlich Etwas einwirkt. Da das Fallen in gleicher Weise rings um die Erde herum stattfindet, so liegt der Gedanke nahe, die Einwirkung könne von der Erde ausgehen; und da alle Körper beim Fallen sich nach der Erde hin bewegen, so schreibt man der Erde eine anziehende Einwirkung auf die Körper, eine Anziehung zu. Dieselbe Einwirkung geschieht nach dem zweiten Gesetze auf einen senkrecht in die Höhe geworfenen Körper; sie wirkt dem Aufsteigen fortwährend entgegen und vermindert die Wege, welche der Körper in einzelnen Zeiträumen beim Steigen zurücklegt, und zwar um eben so viel, als sie die Wege in denselben Zeiträumen beim Fallen vergrößerte. Das Aufsteigen eines senkrecht in die Höhe geschleuderten Körpers ist demnach eine verzögerte, und zwar eine gleichförmig verzögerte Bewegung.

5. Die Geschwindigkeit der Bewegung. Legt ein Körper in kurzer Zeit einen großen Weg zurück, so sagt man im gewöhnlichen Leben, er habe eine große Geschwindigkeit; macht er dagegen in langer Zeit einen kleinen Weg, so sprechen wir von kleiner Geschwindigkeit. Da die Geschwindigkeit in Rechnungen eingeführt wird, so muß sie als eine bestimmte Größe definirt werden, wofür sich offenbar der Weg in einer gewissen Zeit eignet; hierdurch sind in der Mechanik folgende Begriffsbestimmungen entstanden:

a. Bei der gleichförmigen Bewegung versteht man unter Geschwindigkeit den Weg, welcher wirklich in jeder Secunde zurückgelegt wird; (unter Secunde ist hier die mittlere Sonnensecunde zu verstehen).

b. Bei der ungleichförmigen Bewegung muß zwischen der wahren Geschwindigkeit in einem bestimmten Augenblicke und der Mittelgeschwindigkeit während eines bestimmten Zeitraumes unterschieden werden.

Unter der wahren Geschwindigkeit in einem bestimmten Augenblicke versteht man den Weg, welcher von da an in jeder Secunde zurückgelegt werden würde, wenn der Bewegungszustand sich nicht weiter veränderte.

Unter der Mittelgeschwindigkeit während eines bestimmten Zeitraumes versteht man den Weg, welcher während dieser Zeit durchschnittlich in einer Secunde zurückgelegt wird.

Bei der gleichförmig beschleunigten und der gleichförmig verzögerten Bewegung ist die Mittelgeschwindigkeit gleich dem arithmetischen Mittel, d. h. gleich der halben Summe aus der wahren Anfangs- und Endgeschwindigkeit des betreffenden Zeitraumes; denn da die wahre Geschwindigkeit z. B. bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung in der ersten Hälfte des Zeitraumes eben so viel zunimmt wie in der zweiten Hälfte, so findet in der Mitte dieses Zeitraumes jedenfalls jene Mittelgeschwindigkeit statt; in einem beliebigen Zeitpunkte vor der Mitte ist aber die wahre Geschwindigkeit eben so viel unter jener mittleren, als sie in dem entsprechenden Zeitpunkte nach der Mitte über derselben ist; was in dem ersten Zeitpunkte an der Mittelgeschwindigkeit fehlt, wird in dem zweiten ersetzt. Der Verlauf der Bewegung ist demnach, was den Weg anbelangt, ein solcher, als ob der Körper während des ganzen Zeitraumes sich mit der Mittelgeschwindigkeit bewegt hätte.

Ist demnach die Mittelgeschwindigkeit bekannt, so gibt sie die Geschwindigkeit an, mit welcher sich ein Punkt während des betreffenden Zeitraumes gleichförmig bewegen müßte, um den nämlichen Weg zurückzulegen, der bei der ungleichförmigen Bewegung gemacht wird; insofern läßt sich also nach Ermittelung der Mittelgeschwindigkeit die ungleichförmige Bewegung auf die gleichförmige reduciren.

c. Bei der ungleichförmigen Bewegung versteht man unter Acceleration oder Beschleunigung den Zuwachs der Geschwindigkeit in einer Secunde. Einen eigentlichen Zuwachs hat die beschleunigte Bewegung; die verzögerte Bewegung hat eine Abnahme oder Retardation. Indessen können die verzögerte, wie auch die gleichförmige Bewegung als specielle Fälle der beschleunigten Bewegung aufgefaßt werden; bei der eigentlichen beschleunigten Bewegung ist dann die Acceleration positiv, bei der verzögerten negativ, bei der gleichförmigen positiv und negativ zugleich, d. h. gleich Null zu nehmen. Behält die Acceleration ihre Größe unverändert bei, bleibt, wie man sich ausdrückt, die Acceleration constant, so ist die Bewegung eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte.

Nach diesen Feststellungen des Begriffs der Geschwindigkeit lassen sich die Definitionen der verschiedenen Bewegungen schärfer geben: die gleichförmige Bewegung ist diejenige, bei welcher die Geschwindigkeit constant bleibt; die ungleichförmige Bewegung ist diejenige, bei welcher die Geschwindigkeit variabel ist; sie ist beschleunigt oder verzögert, je nachdem die Acceleration positiv oder negativ ist. Eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Acceleration constant ist; eine ungleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung ist eine solche, bei welcher die Acceleration variabel ist.

Hinsichtlich der Buchstabenbezeichnung der eben betrachteten Größen haben sich allmälig in den Lehrbüchern und Studien aller Länder gewisse Gebräuche festgestellt, denen wir uns der Gleichmäßigkeit halber anschließen wollen. So bedeutet

c = celeritas = Geschwindigkeit, erinnert zugleich an constant.
v = velocitas = " " " variabel.
a = acceleratio = Beschleunigung.
g = gravitas = Beschleunigung der Schwere.
s = spatium = Weg.
t = tempus = Zeit.

Tafel bemerkenswerther Geschwindigkeiten.

Ein guter Fußgänger	1,6	Meter
Ein Pferd im Schritt	0,9—1,1	"
Ein Pferd im Trab	2—2,2	"
Ein Pferd im Galopp	4—5	"
Die besten Renner	12	"
Personen-Eisenbahnzug	7—8	"
Schnellzug	14	"
Dampfschiff	3—7	"

Der Rhein zwischen Worms und Mainz	1	Meter
Gewöhnlicher Wind	3—10	„
Heftiger Sturm	30—50	„
Gewöhnliche Flintenkugel	300—400	„
Büchsenkugel	500	„
Granate der deutschen 9cm-Kanone	300	„
Langgranate der 15cm-Ringkanone	500	„
Ein frei fallender Körper nach einer Secunde	9,808	„
Der Schall in der Luft	333	„
Das Licht im leeren Raume	40000	Meilen.
Die Elektricität im Kupferdraht	63000	„
Der Mond auf der Bahn um die Erde	$^1/_7$—$^1/_8$	„
Die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne	4	„
Der erste und der letzte Planet	$6^1/_2$ u. $^2/_3$	„
Die Sonne in ihrer wahrsch. B. um Alkyone	$7^1/_2$	„
Die Kometen in der Sonnennähe	bis 60	„

16 Gesetze der Bewegung. Phoronomie. 1. Gesetze der gleichförmigen Bewegung. Da die constante Geschwindigkeit c der gleichförmigen Bewegung den Weg in 1 Sec. bedeutet, so ist der Weg s in t Sec. das t-fache von c; also sind die Gesetze der gleichförmigen Bewegung:

$$1)\ s = c \cdot t;\quad 2)\ c = s : t;\quad 3)\ t = s : c \qquad (1)$$

2. Gesetze der ungleichförmigen Bewegung. Beginnt eine gleichförmig beschleunigte oder verzögerte Bewegung mit der Geschwindigkeit c, so ist der Zuwachs an Geschwindigkeit in t Sec. $+ at$ oder $- at$, je nachdem die Bewegung gleichförmig beschleunigt oder verzögert ist; folglich ist die Geschwindigkeit nach t Sec.

$$v = c \pm at \qquad (2)$$

Fängt die beschleunigte Bewegung vom Ruhezustande an, so ist $c = 0$, also $v = at$. In diesem wichtigsten Falle verhalten sich also die Geschwindigkeiten wie die Zeiten. Endigt die verzögerte Bewegung mit dem Ruhezustande, so ist $v = 0$, also $0 = c - at$; dies ist der Fall, wenn $c = at$, also wenn $t = c : a$. Diese Formel gibt an, nach welcher Zeit ein verzögert bewegter Körper stille steht.

Zur Bestimmung des Weges in den t ersten Secunden für den wichtigsten Fall, daß eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Geschwindigkeit 0 beginnt, gelangen wir auf folgende Art: Nach t Sec. ist in diesem Falle die Geschwindigkeit $v = at$, also ist die Mittelgeschwindigkeit $= \frac{1}{2}(0 + v) = \frac{1}{2}at$; es wird in Wirklichkeit derselbe Weg zurückgelegt, der bei gleichförmiger Bewegung in t Sec. mit der constanten Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}at$ zurückgelegt würde; dieser letztere ist aber $= \frac{1}{2}at \cdot t = \frac{1}{2}at^2$; also ist bei der gleichförmig bechleunigten, vom Ruhezustande beginnenden Bewegung der Weg in den t ersten Secunden

$$s = \tfrac{1}{2}at^2 \qquad (3)$$

In diesem wichtigsten Falle verhalten sich demnach die Wege wie die Quadrate der Zeiten. Es ist von Interesse, für diesen Fall den Weg auch durch die Geschwindigkeit und umgekehrt auszudrücken; dies kann geschehen, indem man aus den Formeln (2) $v = at$ und (3) $s = \frac{1}{2}at^2$ die Größe t eliminirt, was auf verschiedene Art vorgenommen werden kann. Könnte man z. B. die Gleichungen (2) und (3) so transformiren, daß die neuen rechten Seiten einander gleich wären, so wären auch die neuen linken Seiten einander gleich, und durch wirkliche Gleichsetzung derselben erhielte man die gesuchte Relation zwischen v und s. Die Ausführung dieses Gedankens gelingt, wenn man in (2) beide Seiten quadrirt und in (3) beide Seiten mit 2a multiplicirt:

$$\left.\begin{array}{l} v^2 = a^2t^2 \\ 2as = a^2t^2 \end{array}\right\} v^2 = 2as, \text{ woraus } v = \sqrt{2as} \text{ und } s = \frac{v^2}{2a} \qquad (4)$$

In diesem wichtigsten Falle verhalten sich also die Geschwindigkeiten auch wie die Quadratwurzeln aus den zurückgelegten Wegen, und die Wege auch wie die Quadrate der Geschwindigkeiten.

Für den Fall, daß eine gleichförmig beschleunigte Bewegung mit der Geschwindigkeit c beginnt, läßt sich der in den t ersten Secunden zurückgelegte Weg auf doppelte Art bestimmen. Entweder kann man diesen Weg als eine Summe zweier Wege auffassen, von welchen der eine $= ct$ in Folge der Anfangsgeschwindigkeit allein, und der andere $= \frac{1}{2}at^2$ in Folge der stattfindenden Beschleunigung zurückgelegt wird, wodurch man erhält $s = ct + \frac{1}{2}at^2$. Oder man reducirt die gleichförmig beschleunigte Bewegung mit Hilfe der Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}\{c + (c + at)\} = c + \frac{1}{2}at$ auf eine gleichförmige, wodurch man ebenfalls erhält $s = t(c + \frac{1}{2}at) = ct + \frac{1}{2}at^2$. In derselben doppelten Weise läßt sich auch der Weg für die gleichförmig verzögerte Bewegung bestimmen; jedoch finden wir denselben am einfachsten aus der letzten Formel, wenn wir in derselben $(-a)$ statt a setzen, wodurch entsteht $s = ct - \frac{1}{2}at^2$. Der Weg in den ersten t Secunden bei der gleichförmig beschleunigten oder verzögerten Bewegung ist demnach

$$s = ct \pm \tfrac{1}{2}at^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (5)$$

Wie wir oben den Weg für eine mit dem Ruhezustande beginnende gleichförmig beschleunigte Bewegung bestimmten, so können wir hier den Weg für eine mit dem Ruhezustande endigende gleichförmig verzögerte Bewegung finden, indem wir einfach die Zeit $t = c : a$, nach welcher, wie oben gefunden, ein verzögerter Körper stille steht, in die Formel $s = ct - \frac{1}{2}at^2 = (c - \frac{1}{2}at) . t$ für den Weg bei der gleichförmig verzögerten Bewegung einsetzen. Wir erhalten dann $s = (c - \frac{1}{2}c) . c : a = c^2 : 2a$. Noch einfacher gelangen wir zu diesem Werthe, wenn wir die gleichförmig verzögerte Bewegung mit Hilfe der Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2}(c + 0) = \frac{1}{2}c$ auf eine gleichförmige reduciren; es ergibt sich dann $s = c . t = \frac{1}{2}c . c : a = c^2 : 2a$. Dieser Werth für den Weg bei der gleichförmig verzögerten Bewegung, die mit Ruhe endigt, stimmt vollständig überein mit dem Wege bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung, die mit Ruhe beginnt und mit der Geschwindigkeit c endigt; denn setzen wir in der zweiten Formel (4) statt v das hier geltende c, so ist s ebenfalls $= c^2 : 2a$. Ein gleichförmig verzögerter Körper, der mit der Geschwindigkeit c beginnt und mit 0 endigt, legt demnach denselben Weg zurück, wie ein gleichförmig beschleunigter Körper, der bei gleicher Acceleration mit 0 beginnt und mit c endigt; umgekehrt, sind die Wege bei einer von der Ruhe beginnenden gleichförmig beschleunigten und bei einer mit der Ruhe endigenden gleichförmig verzögerten Bewegung einander gleich, so ist die Schlußgeschwindigkeit jener gleich der Anfangsgeschwindigkeit dieser Bewegung. So kommt eine senkrecht in die Höhe geschossene Kugel mit ihrer Anfangsgeschwindigkeit wieder am Boden an.

Wie für diese Bewegungen die Geschwindigkeit durch den Weg und umgekehrt ausgedrückt werden konnte, so lassen sich auch für die mit einer Geschwindigkeit c beginnende gleichförmig beschleunigte und für die mit einer Geschwindigkeit c aufhörende gleichförmig verzögerte Bewegung nach derselben Methode Beziehungen zwischen Weg und Geschwindigkeit auffinden. Für erstere gelten nach Fl. (2) und (4) die Gleichungen

$v = c + at$ und $s = ct + \frac{1}{2}at^2$, für letztere
$v = c - at$ und $s = ct + \frac{1}{2}at^2$.

Wenn man in beiden Fällen jede Seite der ersten Gleichung quadrirt, sodann jede Seite der zweiten Gleichung mit 2a multiplicirt, und endlich die transformirten Gleichungen verbindet, im ersten Falle durch Subtraction, im letzten durch Addition, so erhält man für die gleichförmig beschleunigte Bewegung die Beziehungen

$$v = \sqrt{c^2 + 2as} = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} + s\right)} \text{ und } s = \frac{v^2 - c^2}{2a} = \frac{(v + c)(v - c)}{2a}$$

und für die gleichförmig verzögerte Bewegung die analogen Beziehungen

$$v = \sqrt{c^2 - 2as} = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} - s\right)} \text{ und } s = \frac{c^2 - v^2}{2a} = \frac{(c - v)(c + v)}{2a}$$

Die Formeln des zweiten Falles entstehen, wie es sein muß, aus denjenigen des ersten Falles, wenn man in diesen (—a) an die Stelle von a treten läßt. Alle Formeln lassen sich auch auf folgende Weise ableiten. Beginnt ein Körper eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit der Geschw. c, so kann man sich vorstellen, diese Anfangsgeschwindigkeit sei dadurch entstanden, daß der Körper bereits vorher den Weg $c^2 : 2a$ mit der Acceleration a und der Anfangsgeschw. 0 zurückgelegt habe; dann ist sofort klar, daß der Weg s als eine Differenz zweier Wege darstellbar ist; nämlich

$$s = \frac{v^2}{2a} - \frac{c^2}{2a} = \frac{v^2 - c^2}{2a}$$

Durch die gleiche Erwägung leitet man auch die Formel für v ab:

$$v = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} + s\right)} = \sqrt{c^2 + 2as}$$

Beginnt aber ein Körper eine gleichförmig verzögerte Bewegung mit der Geschw. c, so ist zu bedenken, daß nach Zurücklegung des Weges $c^2 : 2a$ die Geschw. = 0 ist; hat sich aber die Geschw. erst auf den Betrag v vermindert, so könnte, bis die Geschw. = 0 wird, noch der Weg $v^2 : 2a$ gemacht werden; auch hier erhält man daher den Weg s als eine Differenz zweier Wege:

$$s = \frac{c^2}{2a} - \frac{v^2}{2a} = \frac{c^2 - v^2}{2a} \text{ und ebenso } v = \sqrt{2a\left(\frac{c^2}{2a} - s\right)} = \sqrt{c^2 - 2as}$$

Aus den Formeln des zweiten Falles ergibt sich eine frühere Folgerung in höchst einfacher Weise; aus der Formel für v liest man sofort ab, daß $v = 0$ nur, wenn $s = c^2 : 2a$, womit der Maximalweg σ bis zum Ruhezustande, also z. B. beim Steigen die Steighöhe gefunden ist; aus der Formel für s liest man ab, daß $s = 0$, wenn $v^2 = c^2$, also wenn $v = \pm c$, d. h. daß der Körper durch das Zurücklaufen von der äußersten Stelle bis zum Ausgangspunkte seine Anfangsgeschwindigkeit bei entgegengesetzter Richtung, worauf das entgegengesetzte Vorzeichen hindeutet, wieder erlangt. Diese Folgerung, daß die Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung gleich derjenigen der Rückwärtsbewegung ist, gilt indeß nicht blos für den Anfangs- und Endpunkt der Bahn, sondern für jede Stelle derselben. Setzen wir nämlich in die erste Formel für v statt $c^2 : 2a$ den Maximalweg σ, so ergibt sich $v = \sqrt{2a(\sigma - s)}$; dieselbe Geschw. erhält aber nach der ersten Fl. (4) ein Körper, der mit der constanten Acceleration (+ a) den Weg $(\sigma - s)$ vom Ruhezustande an zurücklegt. Wenn sich also ein Körper mit gleichförmig verzögerter Bewegung bis zum Stillstande fortbewegt und dann mit gleichförmig beschleunigter Bewegung und derselben Acceleration umkehrt, so hat er an jeder Stelle der Rückkehr dieselbe Geschw. wie beim Vorangehen; z. B. beim Herunterfallen hat ein Körper an jeder Stelle dieselbe Geschw. wie beim Aufsteigen an derselben Stelle. Allgemeiner: Ein Körper, der sich mit der Anfangsgeschw. c und der constanten Acceleration (— a) bewegt, besitzt am Ende des Weges s die nämliche absolute Geschwindigkeit, wie ein anderer, der mit der Anfangsgeschw. 0 und der constanten Acceleration (+ a) die Strecke $\sigma - s$ zurückgelegt hat. — Ein ähnliches Gesetz existirt für den Weg, da man statt $s = (c^2 - v^2) : 2a$ auch schreiben kann $s = (\sqrt{(c^2 - v^2)})^2 : 2a$. Ein Körper, der sich mit der Anfangsgeschw. c und der constanten Beschleunigung (— a) bewegte und dadurch am Ende einer gewissen Strecke die Geschw. v erlangte, hat denselben absoluten Weg zurückgelegt, wie ein anderer, der sich mit der Anfangsgeschw. 0 und der constanten Beschleunigung (+ a) bewegte, bis er die Geschw. $\sqrt{(c^2 - v^2)}$ erhielt.

Die Hauptgesetze 2, 3 und 4 der gleichförmig beschleunigten oder verzögerten Bewegung lassen sich mit Atwoods Fallmaschine nachweisen; da diese jedoch hier noch nicht verstanden werden kann, so mag es genügen, mittels einiger Fallversuche wenigstens das Gesetz (3) und damit eigentlich auch die übrigen, da sie in einem inneren Zusammenhange stehen, zur Klarheit zu bringen. Der freie Fall ist nämlich, wie schon erwähnt, eine gleichförmig beschleunigte Bewegung; folglich muß das Gesetz (3) für denselben gelten. Steht uns ein Thurm zu Gebote, der in einer Höhe von 45^m ein Fenster hat, und lassen wir aus demselben eine Bleikugel fallen, so hören wir dieselbe nach 3 Sec. aufschlagen. Nach Fl. (3) ist also $45 = \frac{1}{2}a \cdot 3^2$, woraus $a = 10^m$. Hierdurch haben wir erfahren, daß die Acceleration der Fallbewegung 10^m beträgt, daß also die Erde durch ihre Anziehung einem Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^m ertheilt, weßhalb man diese allgemein mit g bezeichnete Größe auch die Acceleration der Erdschwere oder Gravitation nennt. Lassen wir nun die Kugel aus 20^m Höhe niederfallen, so ist nach derselben Fl. $20 = 5t^2$, woraus $t = 2$ Sec.; die Kugel muß also, wenn unsere Gesetze richtig sind, nach 2 Sec. auf dem Boden anlangen, und wirklich bestätigt das Aufschlagen nach 2 Sec. die Richtigkeit derselben. Bringen wir sie in eine Höhe von 5^m, so gilt die Gl. $5 = 5t^2$, woraus $t = 1$ Sec., was abermals die Richtigkeit der Formel bestätigt. Man kann die Versuche noch in man-

nigfacher Weise verändern, und immer werden sie die Formeln und die in denselben enthaltenen Gesetze bestätigen. Auch für die gleichförmig verzögerte Bewegung lassen sich ähnliche Versuche anstellen, wenn uns ein Mittel zu Gebote steht, einen Körper mit bestimmter Geschwindigkeit senkrecht aufwärts zu werfen; denn wie die Erde einem frei fallenden Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^m ertheilt, so vermindert sie auch die Geschw. eines senkrecht aufsteigenden Körpers in jeder Sec. um 10^m: das senkrechte Aufsteigen eines geschleuderten Körpers ist demnach eine gleichförmig verzögerte Bewegung mit der Retardation oder negativen Acceleration 10^m. Wir können daher die Steigzeit nach Fl. (2) berechnen, und finden dieselbe $= {}^1/_{10}$ v Sec. Wenn nun wirklich der Körper mit derselben Geschw. v wieder am Boden anlangt, dann muß nach (2) seine Fallzeit $= v : g$ ebenfalls $= {}^1/_{10}$ v sein, so daß er nach ${}^1/_5$ v Sec. immer wieder anlangen muß, was man in jedem Falle bestätigt findet. Auch Versuche über die Steighöhe lassen sich unter den angegebenen Voraussetzungen anstellen, um die Formel $s = c^2 : 2a$ zu bestätigen, oder das Gesetz, daß die Steighöhe im geraden Verhältnisse zum Quadrat der Anfangsgeschwindigkeit steht. Wird ein Körper mit einer Geschw. von 10^m senkrecht aufwärts geworfen, so steigt er $10^2 : 2 . 10 = 5^m$ hoch; beträgt seine anfängliche Geschw. 20^m, so erreicht er eine Höhe von 20^m, steigt also bei 2facher Geschw. zur 4fachen Höhe; beginnt er mit einer Geschw. von 30^m aufzusteigen, so ist seine Steighöhe 45^m, ist also bei 3facher Geschwindigkeit 9mal so groß; ebenso erreicht er bei 4, 5, 6 . . . . facher Geschw. eine 16, 25, 36 . . . . fache Höhe. Steht ein Mittel zu Gebote, die Geschw. zu messen, so findet man, daß der Körper immer mit derselben Geschw. wieder zu Boden fällt, mit der er von demselben fortgeschleudert wurde.

Aufgaben. 1. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Aequatorbewohners bei der täglichen Drehung um die Erdachse? Aufl. $c = s : t = 464^m$. — A. 2. Wie groß ist die Geschwindigkeit eines Bewohners von Mainz? Aufl. Der Parallelkreis von Mainz $= 5400 . \cos 50^0 = c^a \cdot 3600$ M., folglich $c = 309^m$. — A. 3. Wie groß ist die Geschwindigkeit der Erde um die Sonne, wenn sie 20 Mill. M. von derselben entfernt ist. Aufl. $c = 4$ M. ca. — A. 4. Wieviele Umdrehungen macht ein Schwungrad von 2^m Radius in einer Stunde, wenn die Geschw. desselben am Umfange 6^m beträgt? Aufl. 1719 Umdrehungen. — A. 5. Eine Locomotive erlangt beim Anlaufe in jeder Sec. eine Geschwindigkeit von 2^{dm}; wann ist die Geschw. $= 12^m$ geworden, und welchen Weg hat sie bis dahin zurückgelegt? Nach Formel (2) ist $t = v : a = 60$ Sec.; nach Formel (3) ist $s = 360^m$. — A. 6. Ein Zug von 12^m Geschwindigkeit verliert beim Endlaufe in jeder Sec. 3^{dm} Geschw.; wann und nach welchem Wege wird er zur Ruhe kommen. Aufl. Nach (2) $t = 40$ Sec.; nach (5) $s = 240^m$. — A. 7. Beim freien Falle erlangt ein Körper in jeder Sec. eine Geschw. von 10^m; welche Geschw. erhält er, und welchen Weg durchläuft er in 6 Sec.? Aufl. Nach (2) $v = 60^m$, nach (3) $s = 180^m$. — A. 8. Ein senkrecht aufwärts geworfener Körper verliert in jeder Sec. 10^m Geschw.; wie lange und wie hoch steigt eine senkrecht aufwärts geschossene Büchsenkugel? Aufl. Nach (2) $t = 50$ Sec.; nach (5) $s = 12500^m$. 17

4. Stoff oder Materie.

Begriff und innere Bildung des Stoffes. Was einen Raum erfüllt, nennen wir Stoff oder Materie. Das innere Wesen des Stoffes ist uns unbekannt. Ueber seine innere Bildung aber sind Rückschlüsse aus seinen Eigenschaften möglich. Es ist bekannt, daß der Stoff zerlegt und in immer kleinere Theilchen getheilt werden kann. Wäre der Stoff innerlich ungetheilt, innerlich zusammenhängend, wie er der oberflächlichen Betrachtung erscheint, so würden wir ihn ebenso wenig theilen können, als wir Stoff zu verwandeln, z. B. Gold aus Eisen zu bereiten, im Stande sind. Es muß demnach die Theilbarkeit des Stoffes uns beweisen, daß er innerlich getheilt ist. Diese innere Getheiltheit kann aber nicht bis ins Unendliche gehen, und ebenso wenig daher die physische Theilbarkeit*); denn sonst müßten die letzten Theilchen $= 0$ sein, während doch etwas Wirkliches nicht aus lauter Nullen bestehen kann. Es muß daher die innere Getheiltheit des Stoffes eine Grenze haben, es muß ungetheilte und daher untheilbare Theilchen im Stoffe geben. Man nennt diese Theilchen Atome (von α privativum und τέμνω = ich schneide). 18

*) Die mathematische, d. i. die gedachte Theilbarkeit hat nur mit unsern Gedanken eine Grenze.

Von den zahlreichen Methoden, die Existenz der Atome abzuleiten, möge noch folgende hier eine Stelle finden: Eine chemische Verbindung z. B. Zinnober, besteht aus ganz bestimmten Mengen der Bestandtheile, hier Schwefel und Quecksilber, welche unzerstörbar und unverändert durch alle nur denkbaren chemischen Processe hindurchgehen und sich unverändert erhalten. Diese Eigenschaft der Erhaltung des Stoffes ist die Grundlage der Chemie. Eine chemische Verbindung zweier Elemente ist nur in der Weise denkbar, daß sich entweder die Stoffe gegenseitig durchdringen oder sich in Theilen an einander lagern. Bei der ersten Anschauung wäre es unmöglich, daß gleiche Mengen derselben Bestandtheile verschiedene Verbindungen liefern könnten. Nun gibt es aber zahlreiche Fälle isomerer Verbindungen, d. i. ganz verschiedener Körper, die aus gleichen Mengen gleicher Bestandtheile zusammengesetzt sind. Die Chemiker führen aus der organischen Chemie sogar fünf Körper von verschiedenen Eigenschaften auf, die aus ganz gleichen Mengen derselben Elemente bestehen. Es ist demnach die Anschauung gegenseitiger Durchdringung der Bestandtheile nicht annehmbar; es bleibt nur die Annahme übrig, daß in den chemischen Verbindungen die Theile eines Körpers neben die Theile eines anderen gelagert sind, daß also z. B. im Zinnober Schwefel- und Quecksilbertheile durch enges Zusammenlagern Zinnobertheile bilden. Wenn nun Zinnober getheilt wird, so erhält man immer wieder Zinnober; da man aber bei immer weiter gehender Theilung endlich an ein Zinnobertheilchen kommt, das nur aus Schwefel- und Quecksilbertheilchen besteht, so müssen bei der letzten Theilung Schwefel- und Quecksilbertheilchen zum Vorschein kommen. Und diese Theilchen, die in der Wirklichkeit der Körperwelt nicht weiter getheilt sind, nennen wir Atome. Wären sie noch weiter theilbar, so würde der chemische Proceß der Verbindung, der ja schon eine bis zu unendlicher Feinheit herabgehende Theilung vollbracht hat, auch noch die weitere Theilung vorgenommen haben. Wir dürfen daher sagen, die Atome sind die kleinsten ungetheilten und daher untheilbaren Theilchen.

Nach allgemeiner Annahme sind die Atome nicht isolirt, nicht gleichmäßig in einem Körper vertheilt, sondern es sind immer zwei oder mehrere enger beisammen als bei den übrigen, vielleicht unmittelbar an einander gelagert. Solche Atomgruppen nennt man Moleküle. Diese Gruppirung findet sich nicht blos in den chemischen Verbindungen, sondern auch in den chemischen Elementen, wie gewichtige chemische und physikalische Thatsachen anzunehmen gebieten. Das Molekül eines Elementes besteht aus lauter gleichen Atomen, das Molekül einer Verbindung aus verschiedenen Atomen; so besteht das Wasserstoff-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff, das Wasser-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff. Wie die verschiedene Gruppirung der Atome die Verschiedenheit von isomeren Stoffen, d. i. aus gleichen Mengen derselben Elemente zusammengesetzten Stoffen begreiflich macht, so kann auch die verschiedene Zahl von Atomen in dem Molekül eines Elementes die Thatsache verständlich machen, daß ein und dasselbe Element mit verschiedenen Eigenschaften ausgestattet vorkommt, z. B. Kohlenstoff als Kohle, Graphit und Diamant, Sauerstoff als Ozon; gelber, rother und schwarzer Phosphor.

Da die Atome und Moleküle der meisten Körper an einander haften, so muß man annehmen, daß sie mit Anziehung begabt sind, daß sie sich einander festhalten, wie die Erde einen Körper festhält. Weil man außerdem zu der Annahme genöthigt ist, daß die Moleküle im Verhältnisse zu ihrer Größe weit von einander entfernt sind, so ist man zu der Meinung gelangt, daß sich zwischen den Körpermolekülen ein höchst feiner Stoff ausbreite, dessen Atome einander abstoßen. Dieser Stoff, dessen Atome man sich noch viel kleiner als die Körperatome denkt, wird Aether genannt. Er ist unsichtbar und unmerkbar durch alle Körper und den ganzen Weltraum verbreitet und der Träger der Licht- und Wärmestrahlen.*) Da

*) Nach dem Wunsche von Collegen mögen hier einige Gründe für das Dasein des Aethers folgen, die wir als dem Schüler noch weniger verständlich in eine Anmerkung verweisen und ihre nähere Ausführung dem Lehrer überlassen: 1) Licht und Wärme strahlen unaufhörlich von allen Sonnen aus und können nur Stoff oder Bewegung sein; sind sie Stoff, so hat derselbe längst alle Zwischenräume der Weltkörper erfüllt; sind sie Bewegung, so muß ein Substrat der Bewegung vorhanden sein, ein Stoff, der sich bewegt; und dieser Stoff muß überall vorhanden sein, was nur bei einer Abstoßung seiner Theilchen denkbar

die kleinsten Mengen der Elemente im freien Zustande die Moleküle sind, und da die Anziehung der viel größeren Körpermoleküle auch viel größer sein muß als die Abstoßung der Aetheratome, ähnlich wie die Anziehung der Erde größer ist als die Schwungkraft der irdischen Körper, so muß sich um jedes Körpermolekül eine Hülle viel dichteren Aethers ansammeln; die chemische Verbindung wäre hiernach das Zusammentreten mehrerer Atome verschiedener Elemente in eine Aetherhülle.

Die äußeren Eigenschaften der Atome sind uns im Ganzen noch ein Geheimniß; doch fallen die Schranken dieses Geheimnisses täglich mehr vor den vereinigten Forschungen der modernen Physik und Chemie. Schon längere Zeit wußte man bezüglich der Atomgewichte, daß Wasserstoff das leichteste aller Atome besitzt, und wieviel mal schwerer die Atome der anderen Elemente sind als das Wasserstoffatom; so ist das Atomgewicht des Sauerstoffs 16, das des Schwefels = 32; diese Atomgewichte sind nicht die Gewichte der kleinsten frei existirenden Mengen der Elemente, weil diese ja als Moleküle auftreten. Die meisten Molekulargewichte sind doppelt so groß als die Atomgewichte; so ist das von Wasserstoff = 2, von Sauerstoff = 32, von Schwefel = 64. Wenn wirklich das Phosphormolekül aus 4 Atomen besteht, so ist das Molekulargewicht $4 \times 31 = 124$; und beim Quecksilber, einem Element, das in Atome aufgelöst sein soll, würden Atomgewicht und Molekulargewicht einander gleich sein = 200. Auch die Größe der Atome ist nicht mehr ganz verschlossen; W. Thomson (1870) berechnet, daß der Durchmesser der Gasmoleküle nicht kleiner als 2 Tausendmilliontel eines Centimeters sein kann. Eine Ahnung von dieser Kleinheit erhält man, wenn man sich einen Wassertropfen bis zur Größe der Erde angeschwollen denkt und sich vorstellt, daß dann nach Thomson die mitgewachsenen Wassermoleküle etwa die Größe von Flintenkugeln erreicht hätten. Loschmidt (1871) gibt die Durchmesser der Moleküle von Wasserstoff zu 4, von Sauerstoff zu 7, von Stickstoff zu 8 Hundertmilliontel eines Centimeters an. Nach Thomson finden sich in 1^{ccm} Gas nicht mehr als 60000 Billionen Moleküle, in 1^{ccm} eines flüssigen oder festen Körpers zwischen 3 und 100 Quadrillionen Moleküle. Die Abstände der Gasmoleküle betragen nach Clausius etwa 1 Zehntausendtel Millimeter, und die Abstände der Moleküle flüssiger und fester Körper 1 bis 2 Tausendmilliontel Centimeter. Der Halbmesser der Wirkungssphäre der Anziehung eines Moleküls, d. i. die Entfernung, innerhalb welcher ein Molekül auf ein anderes noch wirken kann, liegt nach Mousson und Quincke (1873) zwischen 6 und 8 Hunderttausendtel eines Millimeters, ist also 5 bis 10 mal kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Alle diese Zahlen gewinnen dadurch sehr an Wahrscheinlichkeit, daß sie von verschiedenen Forschern nach verschiedenen Methoden gewonnen und nicht wesentlich verschieden groß gefunden wurden. Natürlich haben sie alle etwas Hypothetisches, da die ganze Atomtheorie nur eine Hypothese ist, der indeß die meisten Naturforscher mit wenigen Ausnahmen (der Mineraloge Weiß und seine Schüler) huldigen. Die Philosophen sind der Atomtheorie meist entgegen und halten den Stoff für ungetheilt. (Dynamistische Anschauung im Gegensatze zur atomistischen.)

Das Vorhandensein der **Molekularkräfte**, d. i. der **Anziehung** und **Abstoßung***) in den Molekülen, ergibt sich aus einfachen Versuchen. Zieht man

ist. 2) Nach der dynamischen Gastheorie (§ 54) müssen die Gasmoleküle absolut elastisch sein; wollte man nun den Körperatomen selbst diese Eigenschaft zuschreiben, so wäre die Anziehung, die Bildung chemischer Verbindungen nicht denkbar; verlegt man aber die Abstoßung und Elasticität in die Aetherhülle, so schwindet diese Schwierigkeit, wenn auch nicht jede. 3) Bekanntlich bestehen die Sonnenstrahlen aus 60 bis 1000 Billionen Schwingungen; wollte man nun, wie die Gegner des Aethers thun müssen, die Fortpflanzung des Lichtes durch Glas u. s. w. den Glasmolekülen selbst zuschreiben, so würden dieselben ebenfalls jene Schwingungen vollziehen müssen, also in der höchsten Weißgluth sein. 4) Wäre der Weltraum absolut leer, so dürfte kein Weltkörper eine Verminderung seiner fortschreitenden Bewegungskraft erleiden; da nun eine solche bei dem Encke'schen Kometen nachgewiesen ist, indem die Umlaufzeit in den 19 Wiederkehren seit seiner Entdeckung schon um 2 Tage abgenommen hat, so ist an dem Vorhandensein eines allerfüllenden Mediums nicht zu zweifeln und ist dessen Allerfüllung nur mit den Eigenschaften des Aethers begreiflich. 5) Die Extinction des Fixsternlichtes, Lamont Astronomie 113.

*) Es ist nicht nöthig, die Worte Anziehung und Abstoßung, die offenbar nur eine Uebertragung unseres Kraftgefühls auf die Atome sind, wörtlich zu nehmen und so die Atome mit geheimnißvollen immateriellen Eigenschaften auszustatten. Die Abstoßung des Aethers mag nur eine Wirkung seiner ihm immanenten Bewegung sein und die Anziehung der Rückstoß oder Auftrieb des bewegten Weltäthers. Wir bedienen uns jener Ausdrücke nur so lange, als der tiefere Sachverhalt noch unbekannt ist.

Von den zahlreichen Methoden, die Existenz der Atome abzuleiten, möge noch folgende hier eine Stelle finden: Eine chemische Verbindung z. B. Zinnober, besteht aus ganz bestimmten Mengen der Bestandtheile, hier Schwefel und Quecksilber, welche unzerstörbar und unverändert durch alle nur denkbaren chemischen Processe hindurchgehen und sich unverändert erhalten. Diese Eigenschaft der Erhaltung des Stoffes ist die Grundlage der Chemie. Eine chemische Verbindung zweier Elemente ist nur in der Weise denkbar, daß sich entweder die Stoffe gegenseitig durchdringen oder sich in Theilen an einander lagern. Bei der ersten Anschauung wäre es unmöglich, daß gleiche Mengen derselben Bestandtheile verschiedene Verbindungen liefern könnten. Nun gibt es aber zahlreiche Fälle isomerer Verbindungen, d. i. ganz verschiedener Körper, die aus gleichen Mengen gleicher Bestandtheile zusammengesetzt sind. Die Chemiker führen aus der organischen Chemie sogar fünf Körper von verschiedenen Eigenschaften auf, die aus ganz gleichen Mengen derselben Elemente bestehen. Es ist demnach die Anschauung gegenseitiger Durchdringung der Bestandtheile nicht annehmbar; es bleibt nur die Annahme übrig, daß in den chemischen Verbindungen die Theile eines Körpers neben die Theile eines anderen gelagert sind, daß also z. B. im Zinnober Schwefel- und Quecksilbertheile durch enges Zusammenlagern Zinnobertheile bilden. Wenn nun Zinnober getheilt wird, so erhält man immer wieder Zinnober; da man aber bei immer weiter gehender Theilung endlich an ein Zinnobertheilchen kommt, das nur aus Schwefel- und Quecksilbertheilchen besteht, so müssen bei der letzten Theilung Schwefel- und Quecksilbertheilchen zum Vorschein kommen. Und diese Theilchen, die in der Wirklichkeit der Körperwelt nicht weiter getheilt sind, nennen wir Atome. Wären sie noch weiter theilbar, so würde der chemische Proceß der Verbindung, der ja schon eine bis zu unendlicher Feinheit herabgehende Theilung vollbracht hat, auch noch die weitere Theilung vorgenommen haben. Wir dürfen daher sagen, die Atome sind die kleinsten ungetheilten und daher untheilbaren Theilchen.

Nach allgemeiner Annahme sind die Atome nicht isolirt, nicht gleichmäßig in einem Körper vertheilt, sondern es sind immer zwei oder mehrere enger beisammen als bei den übrigen, vielleicht unmittelbar an einander gelagert. Solche Atomgruppen nennt man Moleküle. Diese Gruppirung findet sich nicht blos in den chemischen Verbindungen, sondern auch in den chemischen Elementen, wie gewichtige chemische und physikalische Thatsachen anzunehmen gebieten. Das Molekül eines Elementes besteht aus lauter gleichen Atomen, das Molekül einer Verbindung aus verschiedenen Atomen; so besteht das Wasserstoff-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff, das Wasser-Molekül aus 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff. Wie die verschiedene Gruppirung der Atome die Verschiedenheit von isomeren Stoffen, d. i. aus gleichen Mengen derselben Elemente zusammengesetzten Stoffen begreiflich macht, so kann auch die verschiedene Zahl von Atomen in dem Molekül eines Elementes die Thatsache verständlich machen, daß ein und dasselbe Element mit verschiedenen Eigenschaften ausgestattet vorkommt, z. B. Kohlenstoff als Kohle, Graphit und Diamant, Sauerstoff als Ozon; gelber, rother und schwarzer Phosphor.

Da die Atome und Moleküle der meisten Körper an einander haften, so muß man annehmen, daß sie mit Anziehung begabt sind, daß sie sich einander festhalten, wie die Erde einen Körper festhält. Weil man außerdem zu der Annahme genöthigt ist, daß die Moleküle im Verhältnisse zu ihrer Größe weit von einander entfernt sind, so ist man zu der Meinung gelangt, daß sich zwischen den Körpermolekülen ein höchst feiner Stoff ausbreite, dessen Atome einander abstoßen. Dieser Stoff, dessen Atome man sich noch viel kleiner als die Körperatome denkt, wird Aether genannt. Er ist unsichtbar und unmerkbar durch alle Körper und den ganzen Weltraum verbreitet und der Träger der Licht- und Wärmestrahlen.*) Da

*) Nach dem Wunsche von Collegen mögen hier einige Gründe für das Dasein des Aethers folgen, die wir als dem Schüler noch weniger verständlich in eine Anmerkung verweisen und ihre nähere Ausführung dem Lehrer überlassen: 1) Licht und Wärme strahlen unaufhörlich von allen Sonnen aus und können nur Stoff oder Bewegung sein; sind sie Stoff, so hat derselbe längst alle Zwischenräume der Weltkörper erfüllt; sind sie Bewegung, so muß ein Substrat der Bewegung vorhanden sein, ein Stoff, der sich bewegt; und dieser Stoff muß überall vorhanden sein, was nur bei einer Abstoßung seiner Theilchen denkbar

die kleinsten Mengen der Elemente im freien Zustande die Moleküle sind, und da die Anziehung der viel größeren Körpermoleküle auch viel größer sein muß als die Abstoßung der Aetheratome, ähnlich wie die Anziehung der Erde größer ist als die Schwungkraft der irdischen Körper, so muß sich um jedes Körpermolekül eine Hülle viel dichteren Aethers ansammeln; die chemische Verbindung wäre hiernach das Zusammentreten mehrerer Atome verschiedener Elemente in eine Aetherhülle.

Die äußeren Eigenschaften der Atome sind uns im Ganzen noch ein Geheimniß; doch fallen die Schranken dieses Geheimnisses täglich mehr vor den vereinigten Forschungen der modernen Physik und Chemie. Schon längere Zeit wußte man bezüglich der Atomgewichte, daß Wasserstoff das leichteste aller Atome besitzt, und wieviel mal schwerer die Atome der anderen Elemente sind als das Wasserstoffatom; so ist das Atomgewicht des Sauerstoffs 16, das des Schwefels = 32; diese Atomgewichte sind nicht die Gewichte der kleinsten frei existirenden Mengen der Elemente, weil diese ja als Moleküle auftreten. Die meisten Molekulargewichte sind doppelt so groß als die Atomgewichte; so ist das von Wasserstoff = 2, von Sauerstoff = 32, von Schwefel = 64. Wenn wirklich das Phosphormolekül aus 4 Atomen besteht, so ist das Molekulargewicht $4 \times 31 = 124$; und beim Quecksilber, einem Element, das in Atome aufgelöst sein soll, würden Atomgewicht und Molekulargewicht einander gleich sein = 200. Auch die Größe der Atome ist nicht mehr ganz verschlossen; W. Thomson (1870) berechnet, daß der Durchmesser der Gasmoleküle nicht kleiner als 2 Tausendmilliontel eines Centimeters sein kann. Eine Ahnung von dieser Kleinheit erhält man, wenn man sich einen Wassertropfen bis zur Größe der Erde angeschwollen denkt und sich vorstellt, daß dann nach Thomson die mitgewachsenen Wassermoleküle etwa die Größe von Flintenkugeln erreicht hätten. Loschmidt (1871) gibt die Durchmesser der Moleküle von Wasserstoff zu 4, von Sauerstoff zu 7, von Stickstoff zu 8 Hundertmilliontel eines Centimeters an. Nach Thomson finden sich in 1ccm Gas nicht mehr als 60000 Billionen Moleküle, in 1ccm eines flüssigen oder festen Körpers zwischen 3 und 100 Quadrillionen Moleküle. Die Abstände der Gasmoleküle betragen nach Clausius etwa 1 Zehntausendtel Millimeter, und die Abstände der Moleküle flüssiger und fester Körper 1 bis 2 Tausendmilliontel Centimeter. Der Halbmesser der Wirkungssphäre der Anziehung eines Moleküls, d. i. die Entfernung, innerhalb welcher ein Molekül auf ein anderes noch wirken kann, liegt nach Mousson und Quincke (1873) zwischen 6 und 8 Hunderttausendtel eines Millimeters, ist also 5 bis 10 mal kleiner als die Wellenlänge des Lichtes. Alle diese Zahlen gewinnen dadurch sehr an Wahrscheinlichkeit, daß sie von verschiedenen Forschern nach verschiedenen Methoden gewonnen und nicht wesentlich verschieden groß gefunden wurden. Natürlich haben sie alle etwas Hypothetisches, da die ganze Atomtheorie nur eine Hypothese ist, der indeß die meisten Naturforscher mit wenigen Ausnahmen (der Mineraloge Weiß und seine Schüler) huldigen. Die Philosophen sind der Atomtheorie meist entgegen und halten den Stoff für ungetheilt. (Dynamistische Anschauung im Gegensatze zur atomistischen.)

Das Vorhandensein der **Molekularkräfte**, d. i. der **Anziehung** und **Abstoßung***) in den Molekülen, ergibt sich aus einfachen Versuchen. Zieht man

---

ist. 2) Nach der dynamischen Gastheorie (§ 54) müssen die Gasmoleküle absolut elastisch sein; wollte man nun den Körperatomen selbst diese Eigenschaft zuschreiben, so wäre die Anziehung, die Bildung chemischer Verbindungen nicht denkbar; verlegt man aber die Abstoßung und Elasticität in die Aetherhülle, so schwindet diese Schwierigkeit, wenn auch nicht jede. 3) Bekanntlich bestehen die Sonnenstrahlen aus 60 bis 1000 Billionen Schwingungen; wollte man nun, wie die Gegner des Aethers thun müssen, die Fortpflanzung des Lichtes durch Glas u. s. w. den Glasmolekülen selbst zuschreiben, so würden dieselben ebenfalls jene Schwingungen vollziehen müssen, also in der höchsten Weißgluth sein. 4) Wäre der Weltraum absolut leer, so dürfte kein Weltkörper eine Verminderung seiner fortschreitenden Bewegungskraft erleiden; da nun eine solche bei dem Encke'schen Kometen nachgewiesen ist, indem die Umlaufzeit in den 19 Wiederkehren seit seiner Entdeckung schon um 2 Tage abgenommen hat, so ist an dem Vorhandensein eines allerfüllenden Mediums nicht zu zweifeln und ist dessen Allerfüllung nur mit den Eigenschaften des Aethers begreiflich. 5) Die Extinction des Fixsternlichtes, Lamont Astronomie 113.

*) Es ist nicht nöthig, die Worte Anziehung und Abstoßung, die offenbar nur eine Uebertragung unseres Kraftgefühls auf die Atome sind, wörtlich zu nehmen und so die Atome mit geheimnißvollen immateriellen Eigenschaften auszustatten. Die Abstoßung des Aethers mag nur eine Wirkung seiner ihm immanenten Bewegung sein und die Anziehung der Rückstoß oder Auftrieb des bewegten Weltäthers. Wir bedienen uns jener Ausdrücke nur so lange, als der tiefere Sachverhalt noch unbekannt ist.

man einen beliebigen Körper aus einander, jedoch nicht über gewisse Grenzen, so kehrt er nach Beseitigung der Einwirkung wieder in seine vorige Gestalt zurück; also ziehen seine Theile einander an. Preßt man den Körper innerhalb gewisser Grenzen zusammen, so dehnt er sich nachher wieder aus; also stoßen seine Theile einander ab. Anziehung und Abstoßung sind im ungeänderten Zustande gleich groß oder im Gleichgewichte; denn wäre die Anziehung überwiegend, so müßten die Theilchen sich mehr einander nähern, wäre aber die Abstoßung überwiegend, so müßten sie sich mehr von einander entfernen; wenn also der Körper ungeändert bleibt, so sind Anziehung und Abstoßung im Gleichgewichte. Nach ihrer Größe, welche von der Lage der Theilchen gegen einander und von ihren Wärmezuständen abhängt, unterscheidet man feste, flüssige und luftförmige Körper, also drei Aggregatzustände. Ein fester Körper ist ein solcher, welcher der Trennung seiner Theile einen großen Widerstand entgegensetzt. Ein flüssiger Körper ist ein solcher, welcher der Trennung seiner Theile nur einen äußerst kleinen Widerstand entgegensetzt. Ein luftförmiger Körper ist ein solcher, dessen Theile sich von selbst von einander trennen, wenn sie nicht durch einen äußeren Widerstand zusammengehalten werden. In den luftförmigen Körpern ist demnach kein Gleichgewicht mehr zwischen Anziehung und Abstoßung, sondern die Abstoßung ist offenbar größer, wird aber durch den äußeren Widerstand im Gleichgewichte gehalten. In den festen Körpern sind Anziehung und Abstoßung sehr groß, weil in diesen die Moleküle am nächsten beisammen sind, und weil jede Naturkraft ihre Wirkung in der größten Nähe am stärksten entfaltet. Wenn nun nach dem Zusammenpressen die Moleküle sich stärker abstoßen als anziehen, während vorher Anziehung und Abstoßung gleich groß waren, so ist dies nur dadurch erklärlich, daß bei abnehmender Entfernung der Moleküle die Abstoßung stärker wächst als die Anziehung; dies Gesetz scheint auch dadurch angezeigt, daß die Abstoßung von den kleineren Aetheratomen, die Anziehung aber von den größeren Körpermolekülen herrührt. Ist dieses Gesetz richtig, so muß bei wachsender Entfernung die Abstoßung stärker abnehmen als die Anziehung, was durch den Versuch mit einem ausgedehnten Körper bestätigt wird, der nach der Ausdehnung sich von selbst wieder zusammenzieht. In den flüssigen Körpern sind Anziehung und Abstoßung beide sehr klein, weil die Theilchen weiter von einander entfernt sind; beim Zusammendrücken wächst nach unserem Gesetze die Abstoßung wieder stark, daher dehnt sich auch jede comprimirte Flüssigkeit wieder aus. Wird aber ein Flüssigkeitstheilchen von der übrigen Masse entfernt, so wird die ohnedies sehr geringe Anziehung gleich Null, die Abstoßung wird durch den Stoß der trennenden Einwirkung unterstützt, weßhalb sich das Theilchen von der Masse trennt. Jedoch muß bei dem Uebergange von dem festen zu dem flüssigen Zustande noch eine Abstoßung außer der des Aethers einwirken, deren Nothwendigkeit beim Uebergange in den Gaszustand noch deutlicher hervortritt. Wird nämlich ein Schoppen Wasser in Dampf verwandelt, so nimmt der Dampf einen tausendfach größeren Raum ein; demnach haben sich die Moleküle viel weiter von einander entfernt als im flüssigen Körper; es müßte demnach die Abstoßung nach unserem Gesetze viel kleiner sein als die Anziehung. Nun ist aber in den Gasen die Abstoßung größer als die Anziehung; folglich muß zu der molekularen Abstoßung noch eine andere Abstoßung beigetreten sein. Da wir die den Aetheratomen zugehörige oder den Molekülen immanente Abstoßung schon in Anspruch genommen haben, so kann diese neue Abstoßung nur in einer Bewegung der Moleküle liegen; denn ein sich bewegendes Molekül entfernt sich von der übrigen Masse, verhält sich also ebenso, als ob es stärker abgestoßen würde. Demnach muß bei dem Uebergange in den Gaszustand, und ebenso bei der Verwandlung eines festen in einen flüssigen Körper den Molekülen Bewegung mitgetheilt werden.

Da nun diese Verwandlung nur durch Mittheilung von Wärme stattfindet, so liegt die Folgerung nahe, Mittheilung von Wärme und Mittheilung von Molekularbewegung seien eins und dasselbe; wir erhalten hierdurch eine Andeutung, daß Wärme nicht anderes ist als Molekularbewegung, sind aber durch diese Betrachtung auch auf den wesentlichen Einfluß hingewiesen, den diese Bewegung auf die Aggregatzustände ausübt.

Nach den Thatsachen der neueren Physik sind nämlich die Moleküle und Atome der Körper nicht in Ruhe, sondern in unaufhörlicher, unendlich feiner Bewegung. Diese Molekularbewegung ist so fein, daß selbst die geschärftesten Sinne dieselbe nicht wahrnehmen können. Nur in Flüssigkeiten hat man eine directe bewegende Folge derselben mittels des Mikroskopes wahrgenommen. Schon Brown hat 1827 feine in Flüssigkeit schwebende Theilchen hin und her zittern sehen (Brown'sche Molekularbewegung); Wiener hat 1863 die Versuche in der Weise angestellt, daß jeder andere Einfluß außer der Flüssigkeit abgeschlossen war, und die Bewegung bis zum Eintrocknen der Wasserschicht, 12 Tage lang, verfolgt und unverändert gefunden*), und Exner hat 1867 gezeigt, daß diese zitternde Bewegung mit der Temperatur steigt, so sehr, daß schwere Zinnobertheilchen dadurch vom Sinken bewahrt bleiben. Wie die Moleküle der Flüssigkeiten, so sind auch die aller anderen Körper in den lebhaftesten und feinsten Bewegungen begriffen; selbst der zäheste Stahl, der härteste Diamant besteht aus ewig hin- und herzitternden Theilchen. Diese feinen Bewegungen bilden die Wärme und erzeugen das Licht; je lebhafter sie sind, desto höher ist die Erhitzung der Körper. Sie bedingen außerdem den Unterschied der drei Aggregatzustände, des festen, flüssigen und luftförmigen Zustandes der Körper.

Die Moleküle eines festen Körpers können nur schwingende Bewegungen um ihre Gleichgewichtslage vollziehen; denn geht ein Molekül aus dieser Lage, in welcher Anziehung und Abstoßung groß und gleich groß sind, heraus, so wird nach unserem Gesetze die Anziehung sofort größer als die Abstoßung und führt dasselbe in jene Lage mit zunehmender Geschwindigkeit zurück. In dieser angelangt, kann es nach dem Gesetze der Trägheit nicht sofort zur Ruhe kommen, es geht über diese Lage hinaus, um dort sogleich wieder die eben geschilderte Wirkung zu erfahren; folglich schwingt das Molekül unaufhörlich hin und her; die Moleküle der festen Körper sind also in einer unveränderlichen, stabilen Gleichgewichtslage, die sie zwar fortwährend verlassen, aber auch immer wieder einnehmen. Ist jedoch die Entfernung der Moleküle von einander so groß geworden, daß ihre Anziehung und die vom Aether herrührende gleiche Abstoßung sehr gering sind, so nimmt zwar nach einem Verlassen dieser Gleichgewichtslage die Anziehung ebenfalls weniger ab als die Abstoßung; die Anziehung war jedoch in der Gleichgewichtslage schon gering, muß daher jetzt noch geringer sein; die vom Aether herrührende Abstoßung wird etwas kleiner sein als diese Anziehung, so daß trotz der Kleinheit letzterer das Molekül umkehren müßte. Hat dasselbe aber durch erhöhte Wärme eine stärkere Molekularbewegung erhalten, so kann es durch den Schwung dieser Bewegung die Anziehung überwinden und wird dann nicht in die Gleichgewichtslage zurückkehren, sondern so weit fortschreiten, bis es gegen andere Moleküle trifft, die es dann festhalten, bis es entweder durch den Stoß der Nachbarmoleküle, oder durch erhöhte Wärme oder einen äußeren Stoß dieselbe wieder verläßt. Ein solches Molekül ist nach dieser Betrachtung sehr leicht verschiebbar, es bildet mit Molekülen gleichen Zustandes einen flüssigen Körper. Die Moleküle flüssiger Körper befinden sich also in leicht veränderlicher labiler

*) Wiener, Grundzüge der Weltordnung S. 180.

Gleichgewichtslage, um welche sie zwar hin- und herschwingen, dieselbe aber häufig verlassen, um zu anderen Molekülen fortzuschreiten. Sind nun die Moleküle eines Körpers noch weiter von einander entfernt, ist also ihre Anziehung verschwindend klein, und ist ihre molekulare Bewegung so stark, daß der Schwung derselben die Anziehung überwiegt, so wird jedes Molekül in gerader Linie fortschreiten, bis es gegen eine feste Wand oder ein anderes Molekül fliegt. Im Momente des Zusammenstoßes wird der Aether so stark verdichtet, daß er das Molekül mit derselben Geschwindigkeit zurückwirft, wonach dasselbe seine geradlinig fortschreitende Bewegung meistens in anderer Richtung fortsetzt. In diesem Falle werden die Moleküle, da sie alle nur denkbaren Richtungen haben können, nach allen Dimensionen aus einander fliegen und nur durch die Festigkeit einer Grenzwand vor der Zerstreuung geschützt werden; sie machen den Eindruck, als ob die molekulare Abstoßung in ihnen ausschließlich wirksam wäre. Solche Moleküle aber bilden einen luftartigen Körper, ein Gas, einen Dampf. Man darf sich indessen nicht vorstellen, daß die Moleküle in den drei Zuständen ausschließlich die geschilderten Bewegungen innehaben. In den 2 letzten Fällen ist nicht immer vorauszusetzen, daß die auf einander schlagenden Moleküle sich immer in der Mitte treffen; sie können auch seitlich auf einander stoßen, und müssen dann auch in drehende Bewegung um eine Achse gerathen. Ebenso ist auch nicht anzunehmen, daß die Atome im Inneren des Moleküls von den Stößen unberührt bleiben; vielmehr liegt die Vermuthung sehr nahe, daß die Atome eines Moleküls gegen einander in Bewegungen verschiedener Art gerathen möchten; endlich könnte auch der Aether, welcher das Molekül umschließt, mannigfaltige Bewegungen annehmen. Die geschilderten Bewegungen sind jedoch die wesentlichsten und bedingen die Aggregatzustände; sie mögen daher kurz zusammengefaßt werden:

Die Moleküle fester Körper vollbringen schwingende Bewegungen um stabile Gleichgewichtslagen; die Moleküle der Flüssigkeiten führen ebenfalls schwingende Bewegungen, aber um labile Gleichgewichtslagen, aus, die häufig in fortschreitende Bewegungen übergehen; die Zahl der Schwingungen geht, wie später erhellen wird, von 60 bis 1000 Billionen in einer Secunde. Die Moleküle der Luftarten besitzen fortschreitende Bewegungen, deren Geschwindigkeit bis über 1800^m in einer Secunde hinausgeht (Clausius 1856).

19 **Masse. Dichte oder Dichtigkeit. Specifisches Gewicht.** Unter der Masse eines Körpers verstehen wir die Menge des Stoffes in dem Körper. Um die Masse zu messen, muß man sie mit einer andern, als Einheit aufgestellten Masse vergleichen. Als Einheit der Masse ist diejenige Masse gewählt worden, welche der Einheit der Kraft bedarf, um in der Einheit der Zeit die Einheit der Geschwindigkeit zu erreichen. Unter dieser Voraussetzung ist die Masse eines Körpers gleich dem Quotienten seines Gewichtes durch die Acceleration der Erdschwere, d. h. ein Körper enthält so viele Massen-Einheiten, als die Acceleration g in seinem Gewichte p enthalten ist oder

$$m = p : g \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (6)$$

Zwei Körper von demselben Stoffe haben gleiche Massen, wenn sie gleich viele Atome des Stoffes enthalten; wären alle Körper von gleichem Stoffe, so würde demnach die Masse einfach nach der Zahl der Atome zu messen sein. Da aber verschiedene Stoffatome eine verschiedene Masse haben können, und da außerdem die Zahl der Atome nicht auffindbar ist, so kann hierdurch die Masse nicht gemessen werden. Ebensowenig ist dies möglich durch das Gewicht; denn das Gewicht eines Körpers ist an verschiedenen Stellen der Erde verschieden, würde auf der Sonne 28 mal so groß und auf dem Monde 6 mal so klein sein als hier, während doch die Menge des Stoffes, die Masse, überall dieselbe bleibt.

Ein Maß für die Masse kann nur in dem eigentlich Massigen, Stofflichen des Stoffes gesucht werden. Wir hörten schon, daß jedes Atom die Eigenschaft hat, auf andere Atome bewegend, anziehend einzuwirken. Diese active Eigenschaft des Stoffes kann aber unmöglich die Stoffnatur ausmachen, da auch Stoff ohne diese active Eigenschaft denkbar ist. Gerade das Gegentheil, die passive Eigenschaft oder Trägheit macht das Stoffliche des Stoffes aus, die Eigenschaft, daß ein Atom nicht auf sich selbst wirken, daß ein Körper nichts an sich selbst verändern kann, daß er einer äußeren Einwirkung, einer Kraft bedarf, um bewegt zu werden. Demnach ist die Masse gleich der Menge desjenigen, das einer Kraft bedarf, um eine gewisse Geschwindigkeit zu erlangen, oder wie Redtenbacher sich ausdrückt, die Masse ist die Menge des Trägen.

Als Einheit der Masse muß daher diejenige Masse angenommen werden, welche der Einheit der Kraft bedarf, um in einer Secunde die Einheit der Geschwindigkeit zu erhalten. Dieser Begriff der Massen-Einheit macht uns die Entwickelung einiger wichtigen Sätze möglich. Um nämlich einer 2ten, 3ten u. s. w. Massen-Einheit dieselbe Geschwindigkeit zu ertheilen, ist noch eine 2te, 3te u. s. w. Kraft-Einheit nöthig; es verhalten sich folglich die bewegenden Kräfte bei gleichen Geschwindigkeiten wie die bewegten Massen. Ebenso ist eine 2te, 3te u. s. w. Kraft-Einheit nöthig, um derselben Masse eine 2te, 3te u. s. w. Einheit der Geschwindigkeit zu ertheilen; es verhalten sich also bei gleichen Massen die bewegenden Kräfte wie die erzeugten Geschwindigkeiten. Nach dem ersten Satze ist für eine 5mal so große Masse eine 5mal so große Kraft nöthig, um dieselbe Geschwindigkeit hervorzurufen; ist aber die Kraft nicht 5mal so groß geworden, sondern dieselbe geblieben, so muß nach dem zweiten Satze die Geschwindigkeit der 5mal so großen Masse 5mal so klein werden; folglich verhalten sich bei gleichen Kräften die erzeugten Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Massen.

Mittels dieser Sätze ist es möglich, aufzufinden, wieviele der oben festgestellten Massen-Einheiten eine Masse m enthält, wenn uns ein Beispiel zu Gebote steht, daß diese Masse durch irgend eine Kraft in irgend einer Zeit eine bestimmte Geschwindigkeit erhält. Ein solches Beispiel bietet der freie Fall; denn hierbei erlangt jede Masse m in 1 Secunde die Geschwindigkeit $g = 10^m$; die Kraft, welche diese Geschwindigkeit erzeugt, ist die Anziehung zwischen der Erde und der Masse m. Wenn aber zwei Massen einander anziehen, d. i. einen Trieb haben, sich einander zu nähern, so kann man die Größe dieses Triebes, also auch der Anziehung finden, wenn man zwischen die beiden Massen einen Körper z. B. ein Brett befestigt, das an die erste Masse angelehnt ist, und dann die Größe des Druckes aufsucht, den dieses Brett von der ersten Masse erleidet; dieser Druck gibt offenbar die Größe der Anziehung an. So übt auch jeder Körper auf der Erde einen Druck auf seine Unterlage aus, weil er von der Erde angezogen wird, und dieser Druck, bekanntlich Gewicht genannt, gibt die Anziehung der Erde an; die Anziehung der Erde gegen die Masse m ist also das Gewicht p dieser Masse, und durch diese Kraft erlangt die Masse in einer Secunde die Geschwindigkeit g. Wenn nun diejenige Masse, die der Kraft 1 bedarf, um die Geschwindigkeit 1 zu erlangen, = 1 gesetzt wird, so wäre die Masse, die der p-fachen Kraft p bedürfte, um dieselbe Geschwindigkeit 1 zu erlangen, auch p mal so groß, also = p, weil bei gleichen Geschwindigkeiten die Kräfte sich wie die Massen, oder die Massen sich wie die Kräfte verhalten. Unsere Masse m erhält jedoch durch die Kraft p nicht die Geschwindigkeit 1, sondern die Geschwindigkeit g. Wenn aber eine Masse nicht die Geschwindigkeit 1 durch eine gewisse Kraft erhält, sondern die g-fache Geschwindigkeit g, so kann dies nur davon herrühren, daß diese Masse kleiner ist, und zwar muß sie nach dem dritten Satze in demselben Verhältnisse kleiner sein als die Geschwindigkeit größer ist; folglich ist unsere Masse $m = p : g$ . . . . (6)
welche Beziehung auch oft unter der Form $p = m \, . \, g$ benutzt wird.

Die Masse eines Körpers ist also der Quotient seines Gewichtes p durch die Acceleration g des Weltkörpers, auf welchem sich der Körper befindet. Auf der Erde ist g ungefähr $= 10^m$; also ist die Masse eines Körpers gleich dem 10ten Theile seines Gewichtes auf der Erde. Ist $p = 10^{kg}$, so ist $m = 10 : 10 = 1$ d. h. die Massen-Einheit besitzt ein Körper, der auf der Erde 10 Kilogramm wiegt.

Dieses Maß der Masse entspricht der Thatsache, daß die Masse sich nicht ändert, wenn ein Körper auf einen andern Weltkörper gebracht würde, da in solchem Falle p und g sich in gleichem Verhältnisse ändern, also den Werth des Bruches $p : g$ unverändert lassen; so wird auf der Sonne das Gewicht 28p, aber die Acceleration nimmt in demselben Verhältnisse zu, ist also 28g, wodurch der Quotient beider, die Masse m, wieder $= p : g$ wird. Ebenso ist in verschiedenen geographischen Breiten das Gewicht eines und desselben Körpers verschieden; allein gerade so, wie sich das Gewicht ändert, ändert sich auch die Acceleration; demnach bleibt der Werth des Bruches $p : g$, die Masse, immer gleich groß. Es genügt also das aufgestellte Maß für die Masse der Anforderung, daß die Masse bei einer Veränderung des Gewichtes constant bleibt. An einem und demselben Orte ist g für alle Körper von gleicher Größe; folglich verhalten sich an einem und demselben Orte die Massen wie die Gewichte; es können demnach die Massen verschiedener Körper an demselben Orte der Erde durch die Gewichte verglichen werden.

Betrachtet man die Masse im Verhältnisse zu dem von ihr eingenommenen Volumen, so führt dies zu dem Begriffe der Dichtigkeit; denn ein Körper ist um so dichter, je mehr Masse er in demselben Volumen enthält. Nahe verwandt mit dem Begriffe der Dichtigkeit ist der des specifischen Gewichtes, da in diesem Begriffe das Gewicht eines Körpers im Verhältnisse zu seinem Volumen betrachtet wird; man sagt, ein Körper ist specifisch schwerer oder hat ein größeres specifisches Gewicht als ein anderer, wenn er in demselben Volumen mehr Gewicht enthält als dieser. Da diese Begriffe häufig verwechselt werden, so wollen wir sie hier nur scharf neben einander stellen, während die Bestimmung des specifischen Gewichtes und der Dichte erst später erfolgen kann:

1. Unter der Dichte oder Dichtigkeit eines Körpers versteht man die Masse der Volumeinheit desselben (specifische Masse).

2. Unter dem specifischen Gewichte eines Körpers versteht man das Gewicht der Volumeinheit desselben.

3. Die Volumeinheit und die Gewichteinheit werden bei festen und tropfbar flüssigen Körpern immer so gewählt, daß das Gewicht der Volumeinheit Wasser oder das specifische Gewicht des Wassers = 1 ist.

4. Weil das Gewicht der Volumeinheit Wasser = 1 gesetzt wird, so gibt das spec. Gew. eines festen oder flüssigen Körpers auch an, wieviel mal so schwer ein beliebiges Volumen des Körpers ist als ein gleiches Volumen Wasser.

5. Da das specifische Gewicht das Gewicht und die Dichte die Masse der Volumeinheit angibt, so besteht zwischen der Dichtigkeit d eines Körpers und seinem spec. Gew. s dieselbe Relation, wie zwischen der Masse und dem Gewichte. Die Beziehungen zwischen Masse und Gewicht sind nach Fl. (6)

$$1)\ m = p : g; \quad 2)\ p = m \cdot g; \quad 3)\ g = p : m$$

Die Beziehungen zwischen Dichte und spec. Gew. sind analog:

$$1)\ d = s : g; \quad 2)\ s = d \cdot g; \quad 3)\ g = s : d$$

Die Dichte ist also nicht gleich dem spec. Gew., sondern gleich dem spec. Gew. dividirt durch die Acceleration g. An einem und demselben Orte der Erde aber ändert sich die Acceleration nicht; daher ist die Dichte eines anderen Körpers $d' = s' : g$; dividirt man die letzte Gleichung durch die zweite Gleichung 1), so erhält man die Proportion $d' : d = s' : s$; die Dichten zweier Körper verhalten sich wie ihre specifischen Gewichte; Eisen ist ebenso vielmal dichter als Wasser, als es schwerer ist als Wasser. Hierdurch entsteht die häufige Verwechselung von Dichte und specifischem Gewichte. — An verschiedenen Orten der Erde ist zwar das Gewicht eines und desselben Körpers verschieden, nicht aber das spec. Gewicht, weil das Gewicht der zu Grunde gelegten Volumeinheit Wasser in dem-

selben Maße zu- oder abnimmt wie das Gewicht des Körpers; ist die Masse einer Volumeinheit Wasser = m, so ist deren Gewicht = mg; ist die Masse desselben Volumens eines anderen Körpers = m', so ist dessen Gewicht = m'g; folglich ist das specifische Gewicht = m'g : mg = m' : m; d. h. dasselbe ist unabhängig von der Erdschwere. Hieraus folgt indeß, daß die Definition des spec. Gew. nur in Verbindung mit dem Satze 3. richtig ist; legt man dagegen die Grammgewichte zu Grunde, so würde die Definition nur für Paris richtig sein; denn nur dort wiegt 1ccm Wasser 1g; indessen ist die Zunahme der Schwere nach den Polen zu doch so unbedeutend, daß man für die Fälle des gewöhnlichen Lebens in den civilisirten Ländern überall das Gewicht von 1ccm Wasser = 1g setzen, (Näheres hierüber in der Lehre von der Schwere 77—80.) und daher auch für das spec. Gew. überall das Gewicht der Volumeinheit eines Körpers nehmen kann; für die Dichtigkeit bestehen diese Einschränkungen nicht.

Aufg. 9. Wie groß ist die Masse eines Körpers von 93kg Gewicht? Aufl. m = 93 : 10 = 9,3; wie groß ist die Masse desselben Körpers auf der Sonne? Aufl. m = 93 . 28 : 10 . 28 = 9,3. — Aufg. 10. Welches Gewicht hat ein Körper auf der Sonne, dessen Masse = 6 ist? Aufl. Nach (6) p = 1680kg. — Aufg. 11. Auf dem Monde wiegt ein Körper, dessen Masse = 6 ist, nur 10kg; wie groß ist dort die Acceleration g? Aufl. Nach (5) g = 1,66 . . . .m.

5. Die Kraft.

1. Begriff, Wesen und Wirkungsweise der Kraft. Unter Kraft verstehen wir die Ursache jeder Veränderung. Da nach neueren Forschungen jede Veränderung in Bewegungsänderungen ihren Grund hat, so ist folgende Definition schärfer: Kraft ist die Ursache der Geschwindigkeitsänderung. Wenn man bei der Definition auf die Herkunft der Kraft sehen will, so muß beachtet werden, daß nach dem Gesetze der Trägheit kein Körper von selbst seinen Zustand ändern kann, und nur dann eine Veränderung zeigt, wenn auf ihn ein anderer Körper einwirkt. Von diesem Standpunkte aus ist Kraft die verändernde Einwirkung eines Körpers auf einen anderen. Wir beobachten nun oft, daß ein Körper auf einen anderen verändernd einwirken kann, wenn er als Ganzes oder in seinen Theilchen in Bewegung ist, daß also seine Kraft in seiner Bewegung liegt; nähere Forschungen ergaben, daß viele Kräfte ihren Grund in Bewegungen der Moleküle haben; überhaupt ist, was das Wesen der Kraft anlangt, die Wissenschaft auf gutem Wege, den Satz zu begründen: Kraft ist Bewegung. Mit der Durchführung dieses Satzes wird der Gedanke der Einheit der Kraft die Grundlage der Physik. Jede bewegte Masse übt aber auf einen anderen Körper, den sie in Bewegung versetzt, einen Druck oder Zug aus; auch wenn wir Menschen einen Körper durch unsere Muskelkraft in Bewegung versetzen wollen, so müssen wir einen Druck oder Zug ausüben; wir setzen daher überall, wo wir eine Bewegung wahrnehmen, ebenfalls das Vorhandensein eines Druckes oder Zuges voraus. Aus diesem Grunde ist es seit alter Zeit gebräuchlich, den Druck oder Zug, der bei einer Bewegung auftritt, als die Ursache der Bewegung, als die Kraft zu bezeichnen. Indessen kann der Druck oder Zug für sich allein keine Bewegung bewirken; vielmehr muß der Körper, der den Druck oder Zug ausübt, in Bewegung sein, wenn eine Bewegung ausgeführt werden soll; die neuere Physik sagt daher, die Bewegung erzeugende Kraft ist nicht der todte Druck oder Zug, sondern Druck oder Zug verbunden mit Bewegung, sie ist Arbeit. Da indessen die Grundbegriffe der Mechanik am besten an Druck und Zug verstanden werden können, so sind in allen physikalischen und mechanischen Lehrbüchern Druck und Zug mit Kraft bezeichnet. In den Ausdrücken „Pferdekraft, lebendige Kraft, Spannkraft, Erhaltung der Kraft, Einheit der Kraft, Wärme ist eine Kraft, Licht ist eine Kraft u. s. w." bedeutet dagegen der Ausdruck Kraft eigentlich Arbeit, d. i. Druck oder Zug verbunden mit Bewegung oder Massenbewegung. Diese doppelte Bedeutung des

20

Ausdruckes Kraft ist ein nicht mehr zu beseitigender Mangel in der Wissenschaft, der den Studirenden zu besonderer Aufmerksamkeit veranlassen muß.

Wir sind aus dem alltäglichen Leben gewöhnt, den Ausdruck Kraft nur da anzuwenden, wo wir eine größere Masse in Bewegung versetzen sehen, während wir in der Physik in diesem Falle vorwiegend von mechanischer Kraft sprechen; da jedoch in der Größe einer Wirkung keine Ursache für eine verschiedene Bezeichnung liegen kann, so ist es folgerichtig, auch die Bewegungen kleinster Theilchen, die z. B. durch Schall und Licht vollbracht werden, als Kraftwirkungen zu bezeichnen; übrigens bewirken dieselben auch unter Umständen größere Massenbewegungen; eine kräftige Stimme vermag Gläser entzwei zu schreien, und das Licht bringt ein Gemenge von Chlor und Wasserstoff zur Explosion. Aber wenn wir auch nicht wüßten, daß Schall und Licht Bewegungen großer und kleinster Massen hervorbringen, so müßten wir sie dennoch Kräfte nennen; denn sie bringen doch offenbar Veränderungen hervor, wie das Licht die Körper erhellt und ihnen Farbe verleiht, wie der Schall in uns die Schallempfindung erweckt; also sind sie nach unserer ersten Definition als Kräfte zu bezeichnen; jede Wirkung muß eine Ursache haben (Causalitätsgesetz); und diese Ursache nennen wir eben Kraft.

In die schärfere Definition sind auch die Kräfte einbegriffen, die eine Richtungsänderung bewirken; denn eine solche findet statt, wenn einem bewegten Körper eine Geschwindigkeit nach einer neuen Richtung gegeben oder genommen wird.

In die schärfere Definition sind natürlich auch die Kräfte einbegriffen, die einen Körper aus dem Zustande der Ruhe in den der Bewegung überführen; denn in ersterem Zustande hat der Körper die Geschw. 0, in letzterem hat er eine größere Geschw., also hat er eine Geschwindigkeitsänderung erfahren. Folgerichtig sind auch jene Ursachen Kräfte, welche eine Bewegung, wenn auch nur scheinbar zerstören, welche einen bewegten Körper zur Ruhe bringen. Wenn z. B. an einem Eisenbahnzuge der Dampfzufluß abgeschlossen und die Bremsen in Wirkung gesetzt werden, so gelangt der Zug durch die Reibung und den Widerstand der Luft allmälig zur Ruhe; also sind Reibung und Widerstand der Luft ebenfalls Kräfte. Wenn ein Stein gegen eine Mauer geschleudert wird, so kommt er zur Ruhe; die Wand enthält also eine Kraft, die wir Festigkeit nennen. Solche Kräfte, die eine Bewegung schwächen, hemmen oder aufheben, nennt man Widerstände oder Gegenkräfte.

Wenn nun eine Kraft im Stande ist, eine Bewegung, d. i. die Wirkung einer anderen Kraft aufzuheben, so liegt die Folgerung nahe, daß sie auch wohl eine andere Kraft aufzuheben im Stande sein dürfte, eine Folgerung, welche wir jeden Augenblick um uns und an uns bestätigt finden können, indem wir z. B. nur die zwei Hände mit gleicher Kraft gegen einander drücken. Demnach gibt es auch Kräfte, die keine Bewegung hervorbringen; diese Erscheinnng ist nur dadurch erklärlich, daß die eine Kraft in jedem Zeittheilchen eine unendlich kleine Bewegung erzeugt, während die andere in derselben Zeit eine ebenso große aber entgegengesetzte Bewegung hervorbringt, wodurch der betreffende Körper immer wieder an seine Stelle versetzt, d. i. in Ruhe erhalten wird. Wenn nun die von beiden Kräften an demselben Körper hervorgebrachten Bewegungen gleich sind, so müssen auch die beiden Kräfte selbst gleich groß sein. Wir gelangen hierdurch zu einer Folgerung, welche in noch viel ausgedehnterem Sinne gilt, und welche Newton als das dritte Gesetz der Mechanik bezeichnet: „actio est par reactioni, jede Wirkung ist gleich der Gegenwirkung, jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft." Dieses Gesetz hat einen mehrfachen Sinn; zunächst spricht es die allgemeine Erfahrung aus, daß zur Ueberwindung einer Kraft, eines Widerstandes eine gleiche Gegenkraft verwendet werden muß. Wenn wir z. B. mittels einer Schnur ein an dieselbe befestigtes Gewicht von 10 Kil. vom Boden aufheben wollen, und nur eine schwache Zugkraft anwenden, so bleibt das Gewicht in Ruhe. Wir müssen durch Anstrengung der Muskeln unsere Zugkraft immer mehr steigern, bis sie die Größe von 10 Kil. erreicht hat; dann erst gelangt das Gewicht zur Bewegung; denn führen wir die Schnur über eine Rolle, so müssen wir mit derselben Kraft wie so eben ziehen, können aber auch unsere Muskelkraft durch ein zweites Gewicht von 10 Kil. ersetzen, und dann das erste leicht bewegen. Dieselbe Erfahrung machen wir, wenn eine Last auf wagrechtem Boden fortgeschoben werden soll; wir erfahren dann einen Widerstand, den wir Reibung nennen, und sind erst dann im Stande, die Last fortzuschieben, wenn unsere Druckkraft dem Widerstande der Reibung gleich geworden ist. Das dritte Gesetz der Mechanik hat weiter den Sinn, daß die Aufhebung einer Kraft gewöhnlich dadurch geschieht, daß dieselbe in dem Körper, auf welchen sie wirkt, eine gleiche Gegenkraft erweckt. Liegt z. B. ein Gewicht auf dem Boden, so übt der Boden einen dem Gewichte gleichen Gegendruck aus; denn wäre dessen Gegendruck größer als das Gewicht, so würde er dasselbe in die Höhe schnellen, wie es z. B. eine zusammengedrückte Polsterfeder thun würde; wäre er kleiner, so würde das Gewicht sinken, wie z. B. auf morastigem Boden, auf weicher Butter; also muß der Gegendruck des Bodens dem Gewichte gleich sein. Dieser Gegendruck ist

nicht schon vorher im Boden vorhanden, sondern wird durch das Gewicht erst hervorgerufen, indem dasselbe, wie schon betrachtet, die Moleküle einander nähert und dadurch deren Abstoßung vergrößert; hierdurch ist es erklärlich, daß ein und derselbe Boden durch seine Festigkeit den verschiedensten Gegendruck ausüben kann je nach der Größe des aufgelegten Gewichtes. Er verhält sich in dieser Beziehung ähnlich wie eine ausgestreckte Hand, auf welche immer mehr Gewichte gelegt werden, und deren Gegendruck wir dann durch größere Anstrengung der Muskeln steigern, oder wie eine elastische Polsterfeder, die bei Vermehrung der aufgelegten Gewichte immer mehr zusammengedrückt wird und dann auch durch ihre Elasticität einen immer größeren Gegendruck ausübt, wie wir uns leicht überzeugen können, wenn wir das Zusammendrücken mit der Hand vernehmen. Ganz ähnliche Schlüsse gelten für eine Schnur, die ein Gewicht trägt; dieses übt auf die Schnur eine Zugkraft aus, die durch einen gleichen Gegenzug der Schnur aufgehoben wird; wäre dieser Gegenzug größer als das Gewicht, so würde es in die Höhe gezogen werden; wäre er kleiner, so würde es sinken; wenn aber weder Heben noch Sinken stattfindet, so ist der Gegenzug dem Gewichte gleich. Die Schnur verhält sich wie ein Magnet, der eine Tragkraft von 100 Kil. hat, aber doch in dem Augenblicke, wo nur 1 Kil. an ihm hängt, nur eine Zugkraft von 1 Kil. ausübt, da er eben nur 1 Kil. trägt. Die Gleichheit von Druck und Gegendruck findet indeß nicht nur in der Ruhe, sondern auch in der Bewegung statt; man spürt den Gegendruck z. B. deutlich, wenn man einen Kahn mittels eines Ruders fortbewegt; in dem Maße, wie wir, um die Bewegung zu beschleunigen, mit dem Ruder stärker gegen das Wasser drücken, fühlen wir auch den Gegendruck des Wassers zunehmen; wir fühlen, daß dieser Gegendruck verschwunden ist in dem Augenblicke, wo unser Druck aufhört. — Den Grundsatz, „Kraft ist gleich Gegenkraft", werden wir in der neueren Mechanik zu der höheren Bedeutung erweitert finden, die er schon in der lateinischen Fassung enthält, zu der Bedeutung, daß auch die Wirkung einer Kraft, ihre Arbeit, immer gleich der Wirkung oder Arbeit einer Gegenkraft ist. — Die der Action gleiche Reaction wird manchmal zur Erzeugung von Bewegungen benutzt, z. B. bei dem Losbrennen der Raketen; die nach unten ausströmenden Pulvergase üben eine so starke Reaction aus, daß sie die Rakete zu ihrer bedeutenden Steighöhe treiben. Die Reaction des Schießpulvers spürt der Jäger als Kolbenstoß und beobachtet der Kanonier am Rückgange der eben losgeschossenen Kanone.

Für die Ansicht, alle Kraft sei Massenbewegung, aller Druck oder Zug entstehe durch Massenbewegung, spricht zunächst die Beobachtung, daß jede bewegte Masse, wenn sie auf andere Körper wirkt, Druck oder Zug ausübt und zwar auf jedem Punkte eines gewissen Weges. Jeder geschlenderte, geworfene, geschossene Körper übt einen Druck aus, wenn er auf andere Körper stößt; ein Wagenzug, in dessen Locomotive der Dampfeinschuß zu Ende ist, wirkt nur durch seine Bewegung, schleppt vermöge derselben sich selbst oder andere noch angehängte Lasten noch lange nach, übt also eine Zugkraft aus. Von solchen Beobachtungen ausgehend ist es allerdings noch ein weiter Weg bis zu dem Ziele, alle Kräfte als Massenbewegungen zu erkennen. Nimmt man indessen mit der neueren Physik an, daß die Moleküle und Atome eines Körpers immer in Bewegung begriffen seien, so liegt das Begreifen aller Naturkräfte als Bewegungen schon näher. Die molekularen Bewegungen eines Körpers können sich auf die Moleküle eines anderen Körpers ganz oder theilweise übertragen, wenn die beiden Körper unmittelbar oder mittelbar durch einen Zwischenstoff mit einander verbunden sind, und können so die molekularen Bewegungen des anderen Körpers ändern. Daß für den Schall, das Licht, die Wärme diese Anschauung richtig ist, unterliegt kaum mehr einem Zweifel; so erklärt sich z. B. die gewaltige Wirkung des Dampfes dadurch, daß die Moleküle desselben unaufhörlich mit großer Geschwindigkeit und in großer Zahl gegen die Grenzwände des Dampfraumes stoßen. Auch für den Magnetismus und die Elektricität ist jene Anschauung nicht unwahrscheinlich, wenn auch noch nicht durchgeführt. Nach dieser Anschauung wäre eine Kraftwirkung ohne Zwischenmedium, eine wahrhafte Fernewirkung, nicht denkbar; hierdurch wird uns abermals die Nothwendigkeit eines weltraumerfüllenden Mediums, des Aethers, nahe gelegt; denn die Anziehung der Weltkörper gegen einander wäre ohne den Aether eine Fernwirkung. Uebrigens sind wir gerade für diese wichtigste Kraft im Weltalle und im Innern jedes Körpers, für die Anziehung, am entferntesten von dem Ziele, dieselbe durch die Bewegung der Moleküle zu begreifen, obwohl schon Versuche vorliegen, sie durch den Stoß des bewegten Aethers zu erklären. Nur eine und zwar die räthselhafteste Anziehung, die chemische Verwandtschaft, ist, sogar ohne Benutzung des Aethers, an der Schwelle der Aufhellung angelangt; die Chemiker fassen dieselbe als eine Verdrängung von Atomen oder Molekülen durch solche andere Atome oder Moleküle, welche durch größere Masse oder größere Geschwindigkeit eine größere Stoßkraft besitzen; die Chemie wird hierdurch „der Kampf ums Dasein unter den Molekülen". — Auch aus dem dritten Grundsatze, „Wirkung

ist gleich Gegenwirkung", läßt sich schließen, daß Kraft Bewegung sei; denn da die Wirkung einer Kraft Bewegung ist, so muß auch die Gegenwirkung, die ja ebenfalls eine Kraft ist, eine Bewegung sein.

Wenn nun Kraft gleich Massenbewegung ist, so ist offenbar das Wesentliche einer Kraft nicht der von derselben ausgeübte Druck oder Zug, sondern die Stärke der in ihr enthaltenen Bewegung. Bei manchen Naturkräften ist man auch so weit gekommen, die Größe einer Kraft durch die in ihr enthaltene Bewegungsstärke auszudrücken, wie z. B. bei der Wärme; außerdem ist bei manchen Kräften der in ihnen enthaltene Druck oder Zug nicht auffindbar oder er ist nach den Umständen höchst verschieden; so übt z. B. eine losgeschossene Kugel auf die Luft, die sie durchfliegt und die ihr nur einen geringen Widerstand entgegensetzt, nach dem dritten Gesetze einen geringen Gegendruck aus, auf Wasser nach demselben Grundsatze einen größeren, auf Holz oder Stein einen noch größeren. Es wäre demnach gewiß wünschenswerth, ebenso wünschenswerth wie die Einheit des Kraftbegriffs, alle Kräfte durch die Stärke der in ihnen vorhandenen Bewegung ausdrücken zu können; allein bei vielen Kräften kennt man noch nicht einmal die Art der in ihnen enthaltenen Bewegung, noch viel weniger aber die Stärke derselben; man weiß von ihnen vielmehr nur, daß sie sich als Druck oder Zug äußern, und kann meistens finden, wie groß derselbe ist. Zu dem Begriffe von Druck und Zug, von Abstoßung und Anziehung, sind wir offenbar dadurch gelangt, daß Menschen und Thiere durch ihre Muskelanstrengung nur ziehende und drückende Kräfte ausüben können; durch eine Zugkraft können wir uns einen Körper nähern, durch einen Druck können wir einen Körper von uns entfernen. Bemerken wir daher, daß Körper oder Körpertheile sich einander nähern, so schreiben wir dies einer Zugkraft oder einer Anziehung derselben gegen einander zu; finden wir, daß Körper oder Körpertheile sich von einander entfernen, so halten wir einen aus einander treibenden Druck, eine Abstoßung für den Grund dieser Erscheinung. Ein Stück Eisen nähert sich einem Magnet; ein nicht unterstützter Körper fällt zur Erde; bei der Abkühlung eines Körpers verkleinert sich der Raum desselben. Wir sprechen in diesen Fällen von Anziehung, von Zugkraft. Wird ein elektrischer Körper von einem leichten Körperchen berührt, so entfernt sich das letztere; eine zusammengedrückte Feder schnellt beim Aufhören des Druckes aus einander; eingeschlossener Dampf kann sein Gefäß sprengen. Dies sind Beispiele von Abstoßung, von Druck. Da man nun den von Kräften ausgeübten Druck oder Zug am deutlichsten wahrnimmt und leicht messen kann, so hat man früher den Druck und Zug für das Wesentliche an Kräften gehalten; außerdem lassen sich Druck nnd Zug als gerade Linien darstellen, welche von dem Sitze des Druckes oder Zuges nach den abgestoßenen oder angezogenen Körpern hinlaufen, also an Richtung und Größe ganz bestimmt sind, wodurch es möglich wird, sie in mathematische Behandlung zu ziehen. Weiter treten Druck oder Zug sehr häufig für sich allein auf, ohne eine Bewegung hervorzubringen, und ohne daß ihr Träger in Bewegung ist. Endlich müssen wir, wenn wir auch die Stärke der Bewegung in einer Kraft für das Wesentliche derselben halten müssen, doch zugestehen, daß jede Kraft einen Druck oder Zug ausübt. Aus allen diesen Gründen wurden Druck und Zug gewöhnlich Kräfte genannt, es wurden Methoden, diese Kräfte zu messen, erdacht, und wurden die gefundenen Größen der mathematischen Betrachtung unterworfen. Man hält es sogar für ein Hauptziel der Physik, alle Kräfte auf Druck und Zug, auf Abstoßung und Anziehung zurück zu führen, oder, da diese Kräfte von einem Körper aus in gerader Richtung auf jeden anderen Körper, wie von einem Centrum aus in den Richtungen der Radien wirken, auf Centralkräfte zu reduciren. Auch wir werden in den folgenden Abschnitten Druck und Zug Kräfte nennen und als solche in Betracht ziehen, und werden hierdurch die Mittel gewinnen, später das Wesentliche der Kräfte, ihre Bewegungsstärke auszudrücken.

21 **2. Eintheilung der Kräfte.** a. Nach der Dauer der Einwirkung theilt man die Kräfte in momentane und continuirliche Kräfte. Was wir eine momentane Kraft nennen, wirkt immer eine gewisse Zeit hindurch, wenn dieselbe auch unmeßbar klein sein mag. Beispiele von momentanen Kräften sind der Stoß, die Explosion und der elektrische Schlag. Eine continuirliche oder dauernde Kraft wirkt entweder unaufhörlich oder doch längere Zeit hindurch. Beispiele solcher Kräfte sind die Anziehung der Erde, die Kraft eines Magnetes, der elektrische Strom u. s. w. Hat eine continuirliche Kraft eine unveränderliche Stärke oder Intensität, so wird sie eine constante Kraft genannt.

b. Nach der Art und dem Erfolge der Einwirkung unterscheidet man mechanische, physikalische und chemische Kräfte. Eine mechanische Kraft ist eine solche, die aus der

Bewegung eines ganzen Körpers oder einer ganzen Masse besteht, wie der Stoß, der Schlag, die Kraft strömenden Wassers und des Windes u. s. w. Da jede bewegte Masse einen Druck oder Zug ausübt, so werden Druck und Zug vorzugsweise mechanische Kräfte genannt, und da die Gesetze der Mechanik auf die ganze Physik Anwendung finden, so betrachten wir zunächst diese mechanischen Kräfte. — Besteht die Kraft aus einer Bewegung der kleinsten Theilchen oder der Moleküle, so wird sie eine physikalische Kraft genannt, wenn sie vorzugsweise Zustandänderungen zur Folge hat, eine chemische Kraft dagegen, wenn sie Stoffänderungen erzeugt. Beispiele physikalischer Kräfte sind die Wärme, das Licht, die Elektricität; Beispiele chemischer Kräfte sind die chemische Verwandtschaft, die katalytische Kraft. Bei den Stoffänderungen wirken indeß gewöhnlich physikalische oder mechanische Kräfte mit; umgekehrt haben die chemischen Kräfte Zustandänderungen zur Folge.

22 **3. Messen der Kräfte.** Unter der Einheit der Kraft verstehen wir den Druck oder Zug, welcher nothwendig ist, um einer freien Masseneinheit in der Zeiteinheit die Einheit der Geschwindigkeit zu ertheilen; hiernach ist die Kraft k, welche im Stande ist, der Masse m in der Zeit t die Geschwindigkeit v zu ertheilen,

$$k = mv : t \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (7)$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Kraft k die ganze Zeit t hindurch unverändert wirkt, daß sie also eine constante Kraft ist; eine solche Kraft bringt aber eine gleichförmig beschleunigte Bewegung hervor, deren Acceleration $a = v : t$ nach Formel (2) ist; setzen wir diesen Werth in Formel (7) ein, so nimmt das Kräftemaß die Gestalt an

$$k = ma \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (8)$$

Wenn wir nun die Kraft messen wollen, welche durch die Anziehung der Erde die Masse m zum freien Falle bringt, derselben also die Acceleration g ertheilt, so müssen wir in der letzten Formel g statt a setzen; wir erhalten dann $k = m$; da nun nach Formel (6) mg gleich dem Gewichte p des bewegten Körpers ist, so gilt hier das Kräftemaß

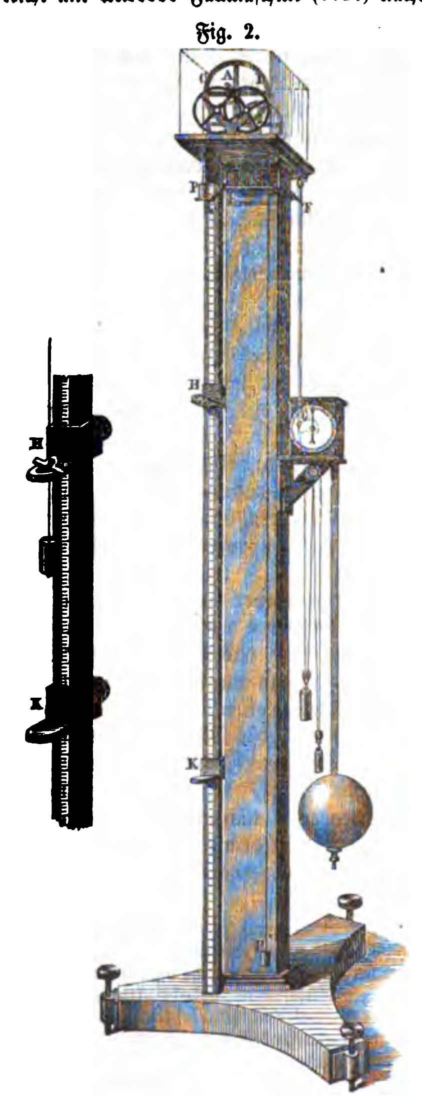
$$k = mg \text{ oder } k = p \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Der Druck oder Zug, welcher einem frei fallenden Körper in jeder Secunde die Geschwindigkeit g ertheilt, ist demnach gleich dem Gewichte des Körpers. Wie man den Druck oder Zug, der den freien Fall erzeugt, durch das Gewicht des Körpers mißt, so kann man auch jeden anderen Druck oder Zug durch das Gewicht ausdrücken, das denselben Druck oder Zug ausübt. Dieses seit alter Zeit gebräuchliche „statische Kräftemaß" erscheint hier durch den Begriff der Masseneinheit in Zusammenhang mit dem schon von Cartesius oder Descartes (1640) verlangten und von Gauß eingeführten „dynamischen Kräftemaß". Es ist nun unsere Aufgabe, dieses eigentlich theoretische Kräftemaß abzuleiten und nachzuweisen; obwohl die beiden übrigen nur andere Formen desselben, also mit demselben begründet sind, so verlangt es doch die Wichtigkeit des Gegenstandes, auch diese einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

23 Ableitung und Nachweis der Formel $k = mv : t$. Wenn Kraft als Ursache der Bewegung definirt wird, so ist es folgerichtig, als Krafteinheit eine solche Kraft zu nehmen, die eine bestimmte Bewegung hervorbringt; man könnte jede beliebige Bewegung zu Grunde legen; die Größe jeder Kraft ist jedoch am einfachsten auszudrücken, wenn man nach Gauß die Bewegung der Masseneinheit mit der Geschwindigkeitseinheit wählt, und die Kraft zur Einheit nimmt, welche diese Bewegung in der Zeiteinheit hervorbringt. Wenn nun 1 Masseneinheit der Krafteinheit bedarf, um in der Zeiteinheit die Geschw. 1 zu erreichen, so bedarf eine 2te, 3te . . . Masseneinheit ebenfalls einer Krafteinheit, und m Masseneinheiten bedürfen m Krafteinheiten, um in der Zeit 1 die Geschw. 1 zu erlangen. Dieselben m Krafteinheiten sind aber immer nöthig, um der Masse m eine 2te, 3te u. s. w. Einheit der Geschw. zu ertheilen; um demnach dieser Masse die vfache Geschw. v zu gewinnen, ist auch das vfache von m Krafteinheiten, also sind mv Krafteinheiten erforderlich. Hierbei ist jedoch vorausgesetzt, daß diese Kraft nur während der Zeit 1 wirkt; würde sie in derselben Weise t Zeiteinheiten hindurch wirken, so würde sie nach dem Gesetze der Trägheit

die Geschw. vt hervorbringen, wie die Lehre von der beschleunigten Bewegung zeigt. Soll jedoch in derselben Zeit nicht die Geschw. vt, sondern nur die Geschw. v entstehen, so ist dies nur dadurch möglich, daß statt mv Krafteinheiten nur der t-te Theil dieser Kraft wirkt; also ist die Kraft, welche der Masse m in der Zeit t die Geschw. v ertheilt, $k = mv : t$. Man schreibt diese Formel, welche die in 19. zur Bestimmung der Masseneinheit angewendeten Sätze in sich faßt, häufig in der Gestalt $kt = mv$. In dieser Gestalt läßt sie sich leicht mit Atwoods Fallmaschine (1781) nachweisen.

Fig. 2.



Diese Fallmaschine (Fig. 2) besteht der Hauptsache nach aus einer sehr leicht beweglichen, am besten auf Frictionsrollen laufenden, möglichst leichten Rolle CAB, über welche eine leicht biegsame Schnur geht, an der beiderseits gleiche Gewichte z. B. von 100g hängen. Unter diesen Umständen sind die Zugkräfte in den beiden Schnurtheilen gleich groß und entgegengesetzt und heben daher einander auf; es herrscht vollständige Ruhe. Wenn jedoch auf das eine Gewicht eine Zulage von 1g, etwa wie bei H sichtbar geformt, aufgelegt wird, so ist dieses Gewicht der Druck, welcher fortwährend auf die ganze Masse von 201g einwirkt und derselben so eine gleichförmig beschleunigte Bewegung ertheilt. Ist nun an der Seite des fallenden Gewichtes eine durchbrochene Platte, wie in der vergrößert dargestellten Nebenfigur bei H sichtbar ist, angebracht, so nimmt diese beim Durchgange dieses Gewichtes die Zulage ab, und das weitergehende Gewicht fällt mit der Geschwindigkeit, die es im Momente des Durchganges besaß; hierdurch ist man im Stande, zu messen, welche Geschwindigkeit die ganze Masse nach einer gewissen Anzahl von Sec. besitzt, die man mittels des Sec. schlagenden Pendelwerkes zählen kann. Die bewegende Druckkraft ist hier $= 0{,}001^{kg}$, die bewegte Masse, bestehend aus der Masse der Zulage und des mitgeschleppten Ballastes von 200g ist $0{,}201 : 10 = 0{,}0201$. Wenn wir nun die Platte H in einer Entfernung von $2{,}5^{cm}$ von dem noch ruhenden Gewichte befestigen und dann die Bewegung beginnen lassen, so geht das fallende Gewicht nach 1 Sec. durch die Platte; es sind nämlich an den Seiten des Gestelles Eintheilungen von Längenmaß, z. B. in Centimeter angebracht, an denen man ablesen kann, welchen Weg die Gewichte in jeder folgenden Sec. zurücklegen; lesen wir nun beim Weitergehen der Gewichte den Weg derselben in jeder Sec. ab, so finden wir, daß die Gesch. $5^{cm} = 0{,}05^{m}$ beträgt. Setzen wir diese Werthe in unsere nachzuweisende Gleichung $kt = mv$ ein, so erhalten wir $0{,}001 . 1 = 0{,}0201 . 0{,}05$ oder $0{,}001 = 0{,}001$; unsere Werthe machen also die Gleichung identisch, d. h. sie sind richtig, und die Gleichung ist gültig. So kann man die Platte H an beliebigen Stellen befestigen, immer die Zeit des Durchganges und die dann folgende Geschw. beobachten, in die Gl. einsetzen und dadurch deren Richtigkeit bewährt finden. Auch kann man beliebige andere Zulagen und andere Ballaste verwenden und immer nach derselben Methode verfahren; da in allen Fällen die Gl. immer richtig bleibt, so ist ihre allgemeine Gültigkeit hiermit nachgewiesen.

Auf ähnliche Weise kann man auch, obwohl dies hiermit schon im Allgemeinen geschehen ist, die einzelnen in dieser Formel (7) enthaltenen und schon in 19. benutzten Sätze nachweisen. Wenn nämlich 2 verschiedene Massen m und m′ in gleichen Zeiten dieselben Geschw. erhalten, so sind die hierzu nöthigen Kräfte $k = mv : t$ und $k' = m'v : t$, woraus durch Division sich ergibt $k : k' = m : m'$, d. h. bei in gleichen Zeiten erlangten gleichen Geschw. verhalten sich die Kräfte wie die Massen. In unserem ersten Versuche wiegt die bewegte Masse 201g, die Kraft 1, und die nach 1 Sec. erlangte Geschwindigkeit ist 5cm. Hängen wir nun beiderseits 200g an, so müssen wir eine Zulage von 2g anbringen, um in derselben Zeit dieselbe Geschw. zu erzielen; in diesem Falle ist die bewegte Masse die von 402g und die Kraft 2g, womit die Richtigkeit des Satzes erwiesen ist; denn $1 : 2 = 201 : 402$. Ebenso lassen sich leicht die Sätze nachweisen: bei gleichen Massen verhalten sich die Kräfte wie die in gleichen Zeiten erlangten Geschwindigkeiten, oder $k : k' = v : v'$, und bei gleichen Massen und gleichen Geschwindigkeiten verhalten sich die Kräfte umgekehrt wie die Zeiten oder $k : k' = t' : t$.

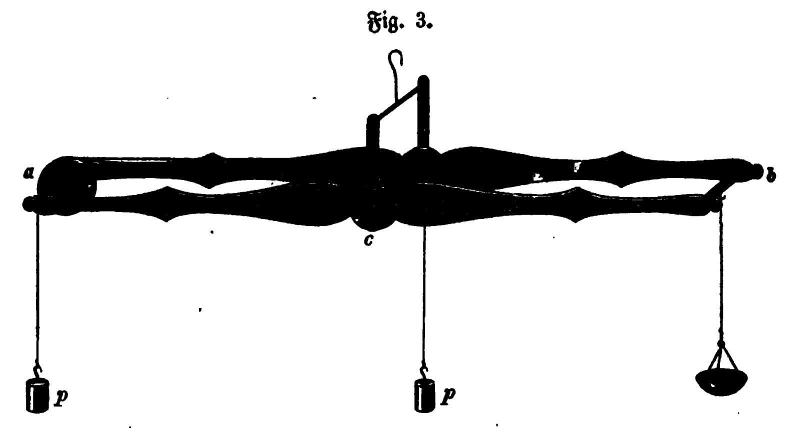
Dem aufmerksamen Leser wird nicht entgehen, daß hier ein scheinbarer Widerspruch mit einem früheren Versuchsresultat vorliegt; wir fanden nämlich früher durch directe Fallversuche, daß die Acceleration der Erdschwere 10m beträgt, während wir bei den Versuchen dieses Abschnittes die in 1 Sec. erreichte Geschw. nur = 5cm fanden. Dies ist aber kein Widerspruch, sondern nur eine neue Bestätigung unseres Gesetzes (7); dasselbe enthält nämlich auch den Satz, daß bei gleichen Kräften die in gleichen Zeiten erreichten Geschw. sich umgekehrt wie die Massen verhalten; in einem Falle ist nämlich $k = mv : t$, in einem anderen $k = m'v' : t$, woraus durch Gleichsetzung $mv = m'v'$ oder $v : v' = m' : m$. Beim freien Falle hat die Kraft von 1g nur ihre eigene Masse zu bewegen, bei unserem Versuche dagegen eine Masse von 201g; die 201fache Masse erhält aber durch dieselbe Kraft nur den 201ten Theil der Geschw., also ist die Geschwindigkeit $v' = 10^m : 201 = 5^{cm}$, womit auch die Richtigkeit der Acceleration 10m nachgewiesen ist. Gerade dieser Umstand, daß bei Atwoods Fallmaschine die Acceleration viel kleiner ist als beim freien Falle, gewährt uns die Möglichkeit, trotz der geringen Höhe des Apparates ausgedehnte Fallversuche anzustellen und die Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung nachzuweisen, was wir jedoch bis zu der Lehre vom freien Falle verschieben wollen. — Weiter wird dem aufmerksamen Leser hier eine Bestätigung der oft ausgesprochenen Thatsache aufstoßen, daß ein todter Druck oder Zug zur Erzeugung einer Bewegung nicht ausreicht, sondern daß der Träger desselben, hier das Zulaggewicht, selbst in Bewegung sein muß, daß demnach die Kraft nicht in Druck und Zug für sich besteht, sondern in Druck oder Zug in Bewegung, in Massenbewegung. Es kann diese Thatsache nicht eindringlich genug betont werden, da aus der irrigen Ansicht über das Wesen der Kraft noch immer Versuche auftauchen, das perpetuum mobile zu finden; manche von diesen unglücklichen Bestrebungen, welche nicht selten das Glück ganzer Familien zerstören, beruhen darauf, daß es durch Combination von Apparaten gelungen ist, Druckvergrößerungen zu gewinnen, während es sich doch in den Maschinen nicht um Druck, sondern um Bewegung, um Arbeit handelt.

Aufg. 12. Welche Kraft ist nöthig, um einen Körper von 50kg in 10 Secunden eine Geschw. von 20m zu ertheilen? Aufl.: $k = 10^{kg}$. — A. 13. Welche Geschw. erlangt ein Körper von 80kg in 5 Sec. durch eine Kraft von 20kg? Aufl.: $v = 12{,}5^m$. — A. 14. Wenn das Geschoß der 15cm-Ringkanone 20kg wiegt und $^1/_{300}$ Secunde im Laufe verweilt, wie groß ist die Kraft des explodirenden Pulvers? $k = 300\,000^{kg}$. — A. 15. Wenn aber der Druck nur 60 000kg, wie man annimmt, groß ist, wie lange muß dann die Kugel im Rohre verweilen? $t = 0{,}0166$ Sec. — A. 16. Ein frei fallender Körper erlangt durch sein eigenes Gewicht in 1 Sec. eine Geschw. von 10m; welcher Ballast müßte zu beiden Seiten der Fallmaschine noch angehängt werden, damit erst in 8 Sec. eine Geschw. von 1m erreicht würde? Aufl.: $k = (p : 10)\ (10 : 1) = ((p + x) : 10)\ (1 : 8)$; hieraus $x = 79p$. — A. 17. An den Schnurenden der Fallmaschine hängen jederseits 400g, auf der einen Seite ist ein Uebergewicht von 5g; wie groß wird die Geschw. nach 4 Sec. sein? Aufl.: $v = {}^1/_4{}^m$. — Diese Beispiele weisen darauf hin, daß eine bewegende Kraft nicht aus einem ruhenden Drucke oder Zuge bestehen kann, daß also eine Bewegung erzeugende Kraft selber in Bewegung sein muß.

24 **Nachweis der zweiten Formel** $k = ma$. Eigentlich ist das zweite Maß für die Kraft nur ein specieller Fall des ersten und demnach mit demselben nachgewiesen. Indessen wollen wir noch einen besonderen Nachweis für dieses Maß beibringen, da dieses Kräftemaß überhaupt nach allen Seiten möglichst klar zu machen ist, und da dieser Nachweis noch eine merkwürdige Beziehung aufklärt; derselbe wird mit Poggendorffs Fallmaschine (1858) geführt, welche auf einer Beobachtung beruht, die wenig bekannt, sehr auffällig ist, und schon von dem arabischen Gelehrten Al Khazini in seinem „Buche der Weisheit" im 12.

Jahrh. mit folgenden Worten angeführt wird: „Das Gewicht eines Körpers, welches an einer bestimmten Stelle einen gewissen Werth hat, ändert sich mit der Entfernung desselben vom Weltcentrum, so daß dasselbe schwerer wird, wenn man ihn vom Centrum entfernt, leichter, wenn man ihn näher bringt." Man beobachtet dies am leichtesten mit Poggendorffs Fallmaschine, Fig. 3. Dieselbe besteht aus einem Wagbalken ab, der aus 2 paral-

Fig. 3.



lelen Schienen zusammengesetzt ist, zwischen denen sich am Mittelpunkte und am einen Ende, z. B. am linken, leicht bewegliche Rollen a und c befinden; über diese Rollen geht eine Schnur, an der gleiche Gewichte p hängen; das an der linken Rolle hängende Gewicht mit der Rolle ist durch eine Wagschale mit Gewichten am rechten Arme balancirt. Legt man nun auf das mittlere Gewicht eine Zulage q, so sinkt diese Masse und die linke steigt. Sowie aber diese Masse steigt, sinkt die ganze linke Wagbalkenhälfte, woraus deutlich zu erkennen ist, daß durch das Steigen der linken Masse ihr Gewicht zugenommen hat; die Ursache liegt darin, daß die Masse m desselben in jeder Secunde eine gewisse Acceleration a nach oben erfährt, daß hierzu eine Kraft ma nach oben nöthig ist, und daß demnach die Masse durch ihre Trägheit dem Steigen stets einen Widerstand ma entgegensetzt, der an der Schnur einen Zug ma nach unten hervorbringt und so das Gewicht um ma vermehrt, was auch aus dem Satze „actio est par reactioni" folgt. Die Masse m kann man leicht nach der Formel $m = p : g$ berechnen und die Acceleration a nach dem Gesetze, daß bei gleichen Kräften die in 1 Sec. erreichten Geschwindigkeiten sich umgekehrt wie die Massen verhalten. Würde das Uebergewicht q nur seine Masse in Bewegung zu versetzen haben, so würde seine Acceleration g sein; nun hat es aber die Masse der Gewichte $2p + q$ zu bewegen; folglich gilt für die Acceleration a die Proportion $a : g = 2p + q : q$, woraus $a = (2p + p) g : q$. Hieraus läßt sich leicht für jedes beliebige Gewicht p und jede beliebige Zulage q der Werth von a berechnen und hierdurch die Zunahme des Gewichtes ma finden; legt man dieselbe in die Schale des Gegengewichtes am rechten Wagbalkenende, so wird das Sinken der linken Hälfte verhindert; hiermit ist nicht nur die Richtigkeit der Erklärung dieser seltsamen Erscheinung, sondern auch der Formel $k = ma$ nachgewiesen. In einfacher Weise ist auch die umgekehrte Erscheinung darzuthun, daß während des Fallens der linken Masse p ihr Gewicht abnimmt, indem sie dem Fallen durch ihre Trägheit einen Widerstand entgegensetzt und dadurch an sich selbst einen Zug nach oben ausübt, der den Zug an der Schnur vermindert. Während des Fallens der linken Masse steigt die linke Wagbalkenhälfte. Das Steigen wird vermindert, wenn man aus der Wagschale das Gewicht ma herausnimmt; hierdurch ist nachgewiesen, daß der Widerstand der mit der Beschleunigung a fallenden Masse m gleich ma ist, und daß demnach die dem Widerstande gleiche beschleunigende Kraft k durch ma gemessen wird.

Macht man die Voraussetzung, daß verschiedene Kräfte auf gleiche Massen wirken, so haben die Massen keinen Einfluß auf die Verschiedenheit der Kräfte; dieselben können dann durch die von ihnen in 1 Sec. erzeugten Geschw. oder die Accelerationen gemessen und dargestellt werden; die lineare Versinnlichung der Kräfte geschieht sogar am häufigsten durch Geschwindigkeiten. Will man Kräfte durch gerade Linien darstellen, so zeichnet man Geraden von derjenigen Größe und Richtung, welche ein und derselbe Körper durch die Wirkung jener Kräfte in 1 Sec. oder in einer anderen für alle Kräfte gleichen Zeit zurücklegen würde. — Auch die verschiedenen Anziehungen der Weltkörper gegen die auf ihren Ober-

flächen befindlichen Massen, die Schwerkräfte der Weltkörper gibt man durch die Accelerationen an, welche sie beim freien Falle den Körpern ertheilen; so ist die Acceleration der Erdschwere ca 10m, d. h. die Erde ertheilt jeder frei fallenden Masse, einerlei ob sie groß oder klein ist, in einer Sec. eine Geschw. von 10m; die Sonne aber ertheilt jeder auf ihr frei fallenden Masse eine Geschw. von 280m; da auch hier die Massen ohne Einfluß sind, so können die Gravitationen von Erde und Sonne durch die Accelerationen 10 und 280m gemessen werden und werden deßhalb diese Zahlen mit g bezeichnet. Uebrigens darf man aus der Thatsache, daß die Acceleration aller frei fallenden Körper 10m ist, nicht den irrthümlichen Schluß ziehen, daß die Erde alle Körper mit gleicher Kraft anziehe. Die Anziehung steht vielmehr im geraden Verhältnisse zu den Massen; 1000 Atome eines Körpers erfahren eine 1000mal so große Anziehung wie ein Atom, sie bedürfen aber auch nach den Kraftgesetzen einer 1000mal so großen Kraft, um dieselbe Geschw. zu erreichen wie ein Atom; sie erhalten also durch die größere Anziehung genau dieselbe Acceleration. Die Acceleration g ist demnach wohl das Maß für die verschiedene Gravitation der Weltkörper, nicht aber für die verschiedene Anziehung, welche verschiedene Massen auf einem und demselben Weltkörper durch diesen erleiden; da hier der Einfluß der Massen nicht wegfällt, so dürfen wir in der Formel $k = ma$ die Masse nicht weglassen; dieselbe nimmt daher hier die Gestalt an $k = mg$. Da nun mg nach Fl. (6) das Gewicht p der Masse ausdrückt, so ist $k = p$; d. h. die Anziehung der Erde gegen einen Körper wird durch dessen Gewicht gemessen*). Ebenso kann auch jede andere Zug- und Druckkraft durch Gewichte ausgedrückt werden.

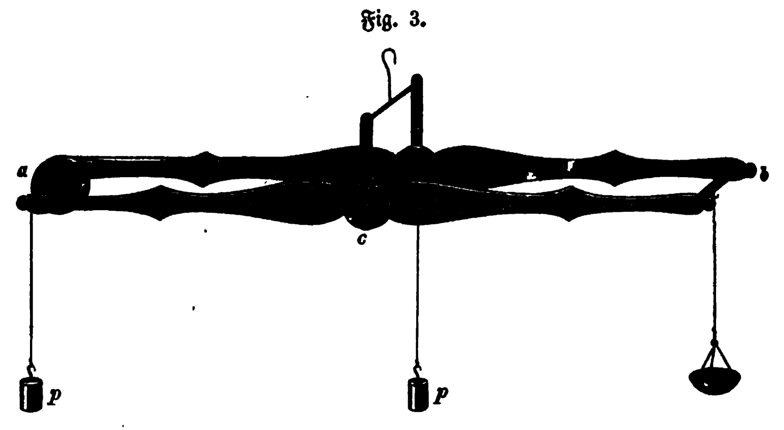
25 Nachweis der dritten Formel $k = p$. Jede Zug- und Druckkraft läßt sich durch ein Gewicht ersetzen, also durch ein Gewicht messen. Am einfachsten ist dies an der neuen Familienwage ersichtlich. Legt man oben auf die Schale derselben Gewichte von 1 bis 10kg, so dreht sich ein Zeiger auf der kreisförmigen Skale und bleibt bei der Zahl stehen, welche mit der Zahl der aufgelegten Kilogramme stimmt. Nimmt man nun die Gewichte weg und übt mit der Hand einen Druck auf die Schale aus, so bewegt sich der Zeiger ebenfalls voran und zwar um so weiter, je stärker man drückt. Ebenso kann man eine Schnur über die Schale legen und an beiden Enden derselben ziehen und dadurch den Zeiger voranbrehen. Man kann also sowohl den Druck, als auch den Zug, den man mit der Hand ausübt, durch aufgelegte Gewichte ersetzen und messen. Dasselbe kann mit jedem anderen Drucke oder Zuge geschehen. Wenn wir einen Faden durch Ziehen an beiden Enden zerreißen, so können wir die Größe der ausgeübten Zugkraft ermitteln, indem wir an einen gleichen Faden soviel Gewicht anhängen, daß derselbe reißt; die gesuchte Zugkraft ist dem angehängten Gewichte gleich; und so lange der Faden noch nicht gerissen ist, übt derselbe einen Zug aus, der nach dem dritten Gesetze der Mechanik dem anhängenden Gewichte gleich ist. — Der Druck, durch welchen wir eine auf einer geneigten Ebene liegende Kugel am Herabrollen hindern oder dieselbe bergan rollen, kann ersetzt und daher gemessen werden durch ein Gewicht, welches an einer von der Kugel ausgehenden und über eine Rolle geführten Schnur hängt. — Die ausdehnende Kraft des Dampfes, der in einem Cylinder einen Kolben vor sich her schiebt, könnte durch ein Gewicht ersetzt und gemessen werden, das in ähnlicher Weise an dem Kolben angebracht wäre. — Die abstoßende Kraft der Wärme, welche einen Körper ausdehnt, muß einem Gewichte gleich sein, welches auf dem Körper liegend diese Ausdehnung eben verhindert, ohne den Körper zusammenzudrücken. — Jede bewegte Masse ist im Stande, in jedem Punkte der Bewegung einen Druck auszuüben, der sich durch ein Gewicht ersetzen und messen läßt. — Wenn eine hohe Spiralfeder durch ein aufgelegtes Gewicht zusammengedrückt wird, so ist ihr Bestreben, sich wieder auszudehnen, ihre Federkraft oder Elasticität, bei dem erreichten Grade der Zusammendrückung dem Gewichte gleich. Wenn man daher durch irgend eine andere Kraft denselben Grad der Zusammendrückung bewirkt, so ist diese Kraft ebenfalls gleich der Federkraft, also auch jenem Gewichte gleich. Hierauf beruht Regniers Kraftmesser oder Dynamometer, mittels dessen man jede beliebige Zug- oder Druckkraft durch Gewichte ausdrücken kann.

Diese Geräthschaft (Fig. 4) besteht aus einem oval gekrümmten federnden Stahlstreifen, der sowohl an seinen Längenenden a und b, als an seinen Breitenenden c und d Handgriffe oder Hängringe trägt. Von den Stellen c und d aus gehen nach innen Metallarme; der obere einfache Arm cf trägt in der Mitte o der ganzen Ovale einen kleinen Zapfen, auf welchem lose ein Röllchen sitzt, das sich an der Hinterseite in einen Zeiger verlängert. Dieser spielt auf einem um den Mittelpunkt o beschriebenen, getheilten Bogen, der eben-

*) Obwohl dieser Gang eine Umkehrung des bei der Bestimmung der Masse eingeschlagenen Verfahrens ist, also sophistisch genannt werden könnte, so wollen wir ihn dennoch wegen des schönen Zusammenhanges der Kräftemaße nicht entbehren.

Jahrh. mit folgenden Worten angeführt wird: „Das Gewicht eines Körpers, welches an einer bestimmten Stelle einen gewissen Werth hat, ändert sich mit der Entfernung desselben vom Weltcentrum, so daß dasselbe schwerer wird, wenn man ihn vom Centrum entfernt, leichter, wenn man ihn näher bringt." Man beobachtet dies am leichtesten mit Poggendorffs Fallmaschine, Fig. 3. Dieselbe besteht aus einem Wagbalken ab, der aus 2 parallelen Schienen zusammengesetzt ist, zwischen denen sich am Mittelpunkte und am einen Ende, z. B. am linken, leicht bewegliche Rollen a und c befinden; über diese Rollen geht eine Schnur, an der gleiche Gewichte p hängen; das an der linken Rolle hängende Gewicht mit der Rolle ist durch eine Wagschale mit Gewichten am rechten Arme balancirt. Legt man nun auf das mittlere Gewicht eine Zulage q, so sinkt diese Masse und die linke steigt. Sowie aber diese Masse steigt, sinkt die ganze linke Wagbalkenhälfte, woraus deutlich zu erkennen ist, daß durch das Steigen der linken Masse ihr Gewicht zugenommen hat; die Ursache liegt darin, daß die Masse m desselben in jeder Secunde eine gewisse Acceleration a nach oben erfährt, daß hierzu eine Kraft ma nach oben nöthig ist, und daß demnach die Masse durch ihre Trägheit dem Steigen stets einen Widerstand ma entgegensetzt, der an der Schnur einen Zug ma nach unten hervorbringt und so das Gewicht um ma vermehrt, was auch aus dem Satze „actio est par reactioni" folgt. Die Masse m kann man leicht nach der Formel $m = p : g$ berechnen und die Acceleration a nach dem Gesetze, daß bei gleichen Kräften die in 1 Sec. erreichten Geschwindigkeiten sich umgekehrt wie die Massen verhalten. Würde das Uebergewicht q nur seine Masse in Bewegung zu versetzen haben, so würde seine Acceleration g sein; nun hat es aber die Masse der Gewichte $2p + q$ zu bewegen; folglich gilt für die Acceleration a die Proportion $a : g = 2p + q : q$, woraus $a = (2p + p) g : q$. Hieraus läßt sich leicht für jedes beliebige Gewicht p und jede beliebige Zulage q der Werth von a berechnen und hierdurch die Zunahme des Gewichtes ma finden; legt man dieselbe in die Schale des Gegengewichtes am rechten Wagbalkenende, so wird das Sinken der linken Hälfte verhindert; hiermit ist nicht nur die Richtigkeit der Erklärung dieser seltsamen Erscheinung, sondern auch der Formel $k = ma$ nachgewiesen. In einfacher Weise ist auch die umgekehrte Erscheinung darzuthun, daß während des Fallens der linken Masse p ihr Gewicht abnimmt, indem sie dem Fallen durch ihre Trägheit einen Widerstand entgegensetzt und dadurch an sich selbst einen Zug nach oben ausübt, der den Zug an der Schnur vermindert. Während des Fallens der linken Masse steigt die linke Wagbalkenhälfte. Das Steigen wird vermindert, wenn man aus der Wagschale das Gewicht ma herausnimmt; hierdurch ist nachgewiesen, daß der Widerstand der mit der Beschleunigung a fallenden Masse m gleich ma ist, und daß demnach die dem Widerstande gleiche beschleunigende Kraft k durch ma gemessen wird.

Fig. 3.



Macht man die Voraussetzung, daß verschiedene Kräfte auf gleiche Massen wirken, so haben die Massen keinen Einfluß auf die Verschiedenheit der Kräfte; dieselben können dann durch die von ihnen in 1 Sec. erzeugten Geschw. oder die Accelerationen gemessen und dargestellt werden; die lineare Versinnlichung der Kräfte geschieht sogar am häufigsten durch Geschwindigkeiten. Will man Kräfte durch gerade Linien darstellen, so zeichnet man Geraden von derjenigen Größe und Richtung, welche ein und derselbe Körper durch die Wirkung jener Kräfte in 1 Sec. oder in einer anderen für alle Kräfte gleichen Zeit zurücklegen würde. — Auch die verschiedenen Anziehungen der Weltkörper gegen die auf ihren Ober-

flächen befindlichen Massen, die Schwerkräfte der Weltkörper gibt man durch die Accelerationen an, welche sie beim freien Falle den Körpern ertheilen; so ist die Acceleration der Erdschwere c^a 10^m, d. h. die Erde ertheilt jeder frei fallenden Masse, einerlei ob sie groß oder klein ist, in einer Sec. eine Geschw. von 10^m; die Sonne aber ertheilt jeder auf ihr frei fallenden Masse eine Geschw. von 280^m; da auch hier die Massen ohne Einfluß sind, so können die Gravitationen von Erde und Sonne durch die Accelerationen 10 und 280^m gemessen werden und werden deßhalb diese Zahlen mit g bezeichnet. Uebrigens darf man aus der Thatsache, daß die Acceleration aller frei fallenden Körper 10^m ist, nicht den irrthümlichen Schluß ziehen, daß die Erde alle Körper mit gleicher Kraft anziehe. Die Anziehung steht vielmehr im geraden Verhältnisse zu den Massen; 1000 Atome eines Körpers erfahren eine 1000mal so große Anziehung wie ein Atom, sie bedürfen aber auch nach den Kraftgesetzen einer 1000mal so großen Kraft, um dieselbe Geschw. zu erreichen wie ein Atom; sie erhalten also durch die größere Anziehung genau dieselbe Acceleration. Die Acceleration g ist demnach wohl das Maß für die verschiedene Gravitation der Weltkörper, nicht aber für die verschiedene Anziehung, welche verschiedene Massen auf einem und demselben Weltkörper durch diesen erleiden; da hier der Einfluß der Massen nicht wegfällt, so dürfen wir in der Formel $k = ma$ die Masse nicht weglassen; dieselbe nimmt daher hier die Gestalt an $k = mg$. Da nun mg nach Fl. (6) das Gewicht p der Masse ausdrückt, so ist $k = p$; d. h. die Anziehung der Erde gegen einen Körper wird durch dessen Gewicht gemessen*). Ebenso kann auch jede andere Zug- und Druckkraft durch Gewichte ausgedrückt werden.

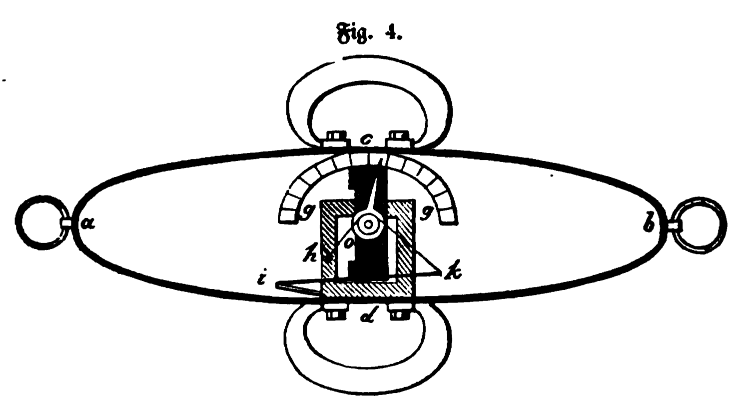
25 Nachweis der dritten Formel $k = p$. Jede Zug- und Druckkraft läßt sich durch ein Gewicht ersetzen, also durch ein Gewicht messen. Am einfachsten ist dies an der neuen Familienwage ersichtlich. Legt man oben auf die Schale derselben Gewichte von 1 bis 10^{kg}, so dreht sich ein Zeiger auf der kreisförmigen Skale und bleibt bei der Zahl stehen, welche mit der Zahl der aufgelegten Kilogramme stimmt. Nimmt man nun die Gewichte weg und übt mit der Hand einen Druck auf die Schale aus, so bewegt sich der Zeiger ebenfalls voran und zwar um so weiter, je stärker man drückt. Ebenso kann man eine Schnur über die Schale legen und an beiden Enden derselben ziehen und dadurch den Zeiger voranbrehen. Man kann also sowohl den Druck, als auch den Zug, den man mit der Hand ausübt, durch aufgelegte Gewichte ersetzen und messen. Dasselbe kann mit jedem anderen Drucke oder Zuge geschehen. Wenn wir einen Faden durch Ziehen an beiden Enden zerreißen, so können wir die Größe der ausgeübten Zugkraft ermitteln, indem wir an einen gleichen Faden soviel Gewicht anhängen, daß derselbe reißt; die gesuchte Zugkraft ist dem angehängten Gewichte gleich; und so lange der Faden noch nicht gerissen ist, übt derselbe einen Zug aus, der nach dem dritten Gesetze der Mechanik dem anhängenden Gewichte gleich ist. — Der Druck, durch welchen wir eine auf einer geneigten Ebene liegende Kugel am Herabrollen hindern oder dieselbe bergan rollen, kann ersetzt und daher gemessen werden durch ein Gewicht, welches an einer von der Kugel ausgehenden und über eine Rolle geführten Schnur hängt. — Die ausdehnende Kraft des Dampfes, der in einem Cylinder einen Kolben vor sich her schiebt, könnte durch ein Gewicht ersetzt und gemessen werden, das in ähnlicher Weise an dem Kolben angebracht wäre. — Die abstoßende Kraft der Wärme, welche einen Körper ausdehnt, muß einem Gewichte gleich sein, welches auf dem Körper liegend diese Ausdehnung eben verhindert, ohne den Körper zusammenzudrücken. — Jede bewegte Masse ist im Stande, in jedem Punkte der Bewegung einen Druck auszuüben, der sich durch ein Gewicht ersetzen und messen läßt. — Wenn eine hohe Spiralfeder durch ein aufgelegtes Gewicht zusammengedrückt wird, so ist ihr Bestreben, sich wieder auszudehneu, ihre Federkraft oder Elasticität, bei dem erreichten Grade der Zusammendrückung dem Gewichte gleich. Wenn man daher durch irgend eine andere Kraft denselben Grad der Zusammendrückung bewirkt, so ist diese Kraft ebenfalls gleich der Federkraft, also auch jenem Gewichte gleich. Hierauf beruht Regniers Kraftmesser oder Dynamometer, mittels dessen man jede beliebige Zug- oder Druckkraft durch Gewichte ausdrücken kann.

Diese Geräthschaft (Fig. 4) besteht aus einem oval gekrümmten federnden Stahlstreifen, der sowohl an seinen Längenenden a und b, als an seinen Breitenenden c und d Handgriffe oder Hängringe trägt. Von den Stellen c und d aus gehen nach innen Metallarme; der obere einfache Arm cf trägt in der Mitte o der ganzen Ovale einen kleinen Zapfen, auf welchem lose ein Röllchen sitzt, das sich an der Hinterseite in einen Zeiger verlängert. Dieser spielt auf einem um den Mittelpunkt o beschriebenen, getheilten Bogen, der eben-

*) Obwohl dieser Gang eine Umkehrung des bei der Bestimmung der Masse eingeschlagenen Verfahrens ist, also sophistisch genannt werden könnte, so wollen wir ihn dennoch wegen des schönen Zusammenhanges der Kräftemaße nicht entbehren.

falls auf dem Arme cf sitzt. Der zweite, doppelte Arm dg trägt einen Stift h und einen schwach federnden Stahlstreifen ik, von dessen Ende k ein Faden sich straff über das Röllchen nach dem Stifte h spannt. Wenn an den Breitenenden gedrückt oder an den Längenenden gezogen wird, bewegen sich die Arme etwas gegen einander, und der Zeiger, der im Ruhezustande auf den mittleren oder Nullpunkt der Skale weist, dreht sich nach rechts; wird dagegen an den Breitenenden gezogen oder an den Längenenden gedrückt, so bewegen sich die Arme aus einander, und der Zeiger dreht sich nach links; die an den vom

Fig. 4.



Zeiger erreichten Strichen stehenden Zahlen geben die Größe der ausgeübten Kraft an. Diese Zahlen wurden empirisch ermittelt; die Geräthschaft wurde an einem Ende aufgehängt, am anderen Ende durch Gewichte beschwert, und dann das Gewicht an der erreichten Zeigerstelle angemerkt. Will man z. B. die Zugkraft eines Pferdes ermitteln, so wird der Apparat z. B. an eine Säule befestigt und das Pferd an den Apparat gespannt und dann zum Ziehen angetrieben. Menschen können Zug- und Druckkräfte von ca 50kg, Pferde von 2 bis 300kg ausüben. Auch die Messung der Kräfte durch Gewichte macht es möglich, dieselben als Linien darzustellen; man zeichnet gerade Linien, die nach dem Punkte zulaufen, auf welchen die Kräfte wirken und den man Angriffspunkt nennt, und deren Richtungen mit denen der Kräfte zusammen fallen; die Längen der Geraden macht man gleich so vielen beliebigen Längeneinheiten als die Kraft beliebige Gewichteinheiten enthält.

26 **4. Wirkungen der Kräfte.** a. Die Arbeit. Die im practischen Leben wichtigste Wirkung der Kräfte ist die Arbeit. **Unter Arbeit verstehen wir die Ueberwindung eines Widerstandes auf jedem Punkte eines gewissen Weges.**

Wenn z. B. ein Körper in die Höhe gehoben werden soll, so muß das Gewicht also der Druck des Körpers nach unten an jeder Stelle des Höhenweges getragen werden. Wird ein Körper auf einer wagrechten Bahn fortgeschoben, so ist zwar sein Gewicht nicht zu heben; indessen erfährt man doch fortwährend einen Widerstand, den Widerstand der Reibung, dem man auf jedem Punkte des Schubweges einen gleichen Druck entgegensetzen muß. Soll ein Stück Holz durchgesägt werden, so hat man an jeder Stelle des Weges der Säge die Festigkeit der Fasern zu bewältigen. Kurz jede Arbeit besteht darin, daß eine Gegenkraft, ein entgegenwirkender Druck oder Zug, ein Widerstand auf jedem Punkte eines gewissen Weges überwunden werden muß; die Arbeit ist offenbar um so größer, je größer der Widerstand und je größer der Weg ist. Wenn man statt 1kg deren 2 auf gleiche Höhe hebt, so hat man offenbar 2 mal soviel Arbeit verrichtet; wenn eine Locomotive 20 Lastwagen von gleichem Gewichte nachschleppt, so ist ihre Arbeit 20 mal so groß als bei dem Fortziehen eines Wagens. Ebenso wächst aber auch die Arbeit direct mit dem Wege; wird ein Gewicht auf 3 fache Höhe gehoben, so hat es eine 3 mal so große Arbeit erfahren; die Fahrpreise richten sich nicht allein nach den transportirten Massen, sondern wachsen auch in gleichem Maße mit den Entfernungen.

Die Einheit der Arbeit ist diejenige Arbeit, die nothwendig ist, wenn ein Widerstand von 1kg auf einem Wege von 1m überwunden wird; man nennt diese Einheit der Arbeit Meterkilogramm und bezeichnet sie mit **mk.** Die Arbeit, welche nöthig ist, um einen Widerstand von qkg auf dem Wege von hm zu

überwinden, ist folglich $= qh^{mk}$; die Arbeit, welche ein Widerstand, eine Gegenkraft in Anspruch nimmt, wenn sie auf einem gewissen Wege überwunden wird, ist demnach das Product der Gegenkraft mit dem Wege. Der Widerstand nimmt diese Arbeit in Anspruch, consumirt sie, erleidet sie; man nennt sie daher consumirte oder erlittene Arbeit. Diese Arbeit kann nicht durch einen ruhenden Druck oder Zug geleistet werden, sondern nur durch einen Druck oder Zug in Bewegung; denn eine ruhende Kraft vermöchte eine Gegenkraft wohl an einem Punkte, nicht aber an allen Stellen eines Weges aufzuheben; es muß also der wirksame Druck oder Zug, die Kraft k, ebenfalls einen gewissen Weg s zurücklegen; hierbei bringt die Kraft k eine Arbeit hervor. Wie die vom Widerstande consumirte Arbeit gefunden wird, indem man diese Gegenkraft mit dem Wege multiplicirt, so wird auch die von der Kraft producirte oder geleistete Arbeit gefunden, indem man sie mit dem Wege multiplicirt; **die von der Kraft producirte oder geleistete Arbeit ist demnach gleich dem Producte der Kraft mit dem Wege $= ks$.**

Wie wir später sehen werden, ist die von der Kraft producirte Arbeit gleich der von dem Widerstande, der Last, consumirten Arbeit, wie es schon das 3te Gesetz der Mechanik ausspricht. Der Begriff der Arbeit ist der wichtigste Begriff der neueren Physik; auch hier erfahren wir wieder, daß dasjenige, was Bewegung erzeugt, was eine practische Wirkung hervorbringt, nicht der ruhende Druck oder Zug, sondern das Product von Druck oder Zug in den Weg ist; die Kraft ist Arbeit. Es wäre vorzuziehen, wenn die Benennung Kraft nur Arbeit bedeuten würde; indessen ist es bis jetzt nicht zu vermeiden, auch den blosen Druck oder Zug mit Kraft zu bezeichnen, wie es in obigen Betrachtungen geschehen ist und noch weiter geschehen wird. Der Körper, welcher Arbeit entwickelt, wird Motor genannt; so ist fließendes oder hochstehendes Wasser ein Motor, Dampf ist ein Motor, Menschen und Thiere sind Motoren. Indessen wird der Name Motor auch häufig für die Maschine angewendet, auf welche der die Arbeit entwickelnde Stoff einwirkt, oder welche die Arbeit dieses Motors aufnimmt; so nennt man ein Wasserrad, eine Dampfmaschine manchmal Motor; oft werden jedoch diese Maschinen Kraftmaschinen genannt, während eine Maschine, die mittels eines Motors Arbeiten verrichtet, welche früher von Handwerkern verrichtet wurden, Arbeitsmaschinen genannt werden; so sind die Hobelmaschinen, die mechanischen Drehbänke, die Maschinensägen u. s. w. Arbeitsmaschinen.

Aufg. 18. Welche Arbeit consumirt ein Gewicht von 200^{kg}, wenn es 17^{cm} hoch gehoben wird? Aufl.: $200 : 0,17 = 34^{mk}$. — A. 19. Welche Arbeit ist nöthig, um einen Menschen von 80^{kg} Gewicht zwei Treppen hoch von 40 Stufen à 20^{cm} Höhe zu befördern? Aufl.: 640^{mk}. — A. 20. Welche Arbeit producirt ein Mensch von 70^{kg} Gewicht, der eine Last von 20^{kg} auf einen Berg von 500^{m} Höhe trägt? Aufl.: 45000^{mk}. — A. 21. Welche Arbeit verrichtet dieser Mensch, wenn er auf wagrechter Bahn 1 M. weit geht, vorausgesetzt, daß ein Mensch bei jedem Schritte (à 60^{cm}) seinen Körper 2^{cm} heben muß, und wenn wir die Arbeit zur Bewegung der Glieder außer Berechnung lassen? Aufl.: $70\ (7420 : 0,6)\ .\ 0,02 = 17314^{mk}$. — A. 22. Welche Arbeit consumirt ein Postwagen, der mit dem Inhalt 1500^{kg} wiegt, auf einer wagrechten Straße von 3 M. Länge; auf wagrechten Straßen wird der Widerstand, den ein Wagen durch die Reibung entwickelt, zu $^1/_{30}$ seines Gewichtes geschätzt? Aufl.: $^1/_{30}\ .\ 1500\ .\ 3\ .\ 7420 = 1\,113\,000^{mk}$. — A. 23. Ein Eisenbahnzug leistet durchschnittlich einen Widerstand von $^1/_{200}$ seines Gewichtes; welche Arbeit ist nöthig, um einen Zug 1 M. weit fortzubewegen, wenn er hierbei um 100^{m} steigt; das Gewicht des Zuges betrage 150^{t} à 20 Ctr. oder 1000^{kg}? Aufl.: $^1/_{200}\ .\ 150000\ .\ 7420 + 150000\ .\ 100 = 20\,565\,000^{mk}$. (Aus den hierbei auftretenden großen Zahlen ergibt sich die Nothwendigkeit einer anderen Schätzungsweise; diese ist dadurch möglich, daß man die Arbeit für eine kurze Zeit ins Auge faßt und eine größere Einheit zu Grunde legt.) — A. 24. Welche Arbeit consumirt ein Holzschlitten von 10^{kg} Gewicht, der 50^{kg} trägt, wenn er auf einer ebenen Bahn 1000^{m} fortbewegt werden soll, auf welcher die Reibung $^1/_2$ der Last beträgt? Aufl.: $^1/_2\ .\ 60\ .\ 1000 = 30000^{mk}$. — A. 25. Wie groß wird die Arbeit, wenn Räder angebracht werden, wodurch die Reibung auf $^1/_{20}$ der Last sinkt? Aufl.: 3000^{mk}. — A. 26. Wie groß ist in beiden Fällen die Arbeit, wenn eine Steigung der Bahn von 5% stattfindet? Aufl.: Im ersten Falle $30000 + 60\ .\ 50\ . = 33000^{mk}$, im zweiten Falle 6000^{mk}. — A. 27. Welche Arbeit nimmt ein Rammklotz von 500^{kg} in Anspruch, wenn er während 8 Stunden jede Minute 10 mal auf eine Höhe von 1^{m} zu heben ist und die Reibung $^1/_{25}$ der Last beträgt? Aufl.: $10\ .\ 60\ .\ 8\ .\ 1\ (500 + 20) = 2\,496\,000^{mk}$. — A. 28. Welche Arbeit ist nöthig,

um einen Eimer voll Wasser, 36kg wiegend, aus einem Brunnen von 15m Tiefe zu ziehen, wenn die Reibung 1/12 der Last beträgt? Aufl.: 585mk. — A. 29. Welche Arbeit producirt eine Wassermasse von 1200kg, die 10m hoch herabstürzt? Aufl.: 1200 . 10 = 12000mk. — A. 30. Welche Arbeit leisten 10 Männer, die auf einem Wege von 150m jeder einen Druck von 20kg ausüben? Aufl.: 30000mk. — A. 31. Welche Arbeit producirt Dampf, der mit einem Druck von 3 Atmosphären einen Kolben von 60cm Durchmesser 2000 mal in einem Cylinder von 1m Länge hin- und herschiebt? Aufl.: Eine Atmosphäre erzeugt einen Druck von 1,0328kg auf 1qcm; daher ps = 1,0328 . 3,1416 . 30² . 3 . 4000 = 35 042 160mk. — A. 32. Wie läßt sich Arbeit als Fläche darstellen? Als Rechteck (Fig. 5), dessen eine Seite = s und dessen andere Seite = k ist; denn der Inhalt dieses Rechtecks = ks = der Arbeit. — A. 33. Wie groß ist demnach die Arbeit des Dampfes von A. 31 bei einem Kolbenhube, wenn der Druck des Dampfes von 3 Atm. gleichmäßig bis zu 0 abnimmt? Aufl.: Wie leicht aus Fig. 6 ersichtlich = ½ ks = ½ . 1,0328 . 3,1416 . 30². 3 . 1 = 4380mk. — Aufgabe 34. Die Arbeit von 2000 Kolbenspielen = 17 520 000mk. — A. 35. Wie groß ist die Arbeit, wenn der Druck von 3 bis 2 Atm. regelmäßig abnimmt? Aufl.: Fig. 7 zeigt, daß hier die Arbeit gleich dem Inhalt des Paralleltrapezes ist, also ½ (k + k₁) s = ½ . 1,0328 . 3,1416 . 30² (3 + 2) . 4000 = 29 201 800mk. — A. 36. Wie ergibt sich die Arbeit, wenn der Druck nach irgend einem anderen Gesetze veränderlich ist? Aufl.:

Fig. 5.

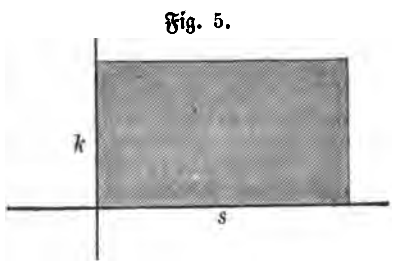
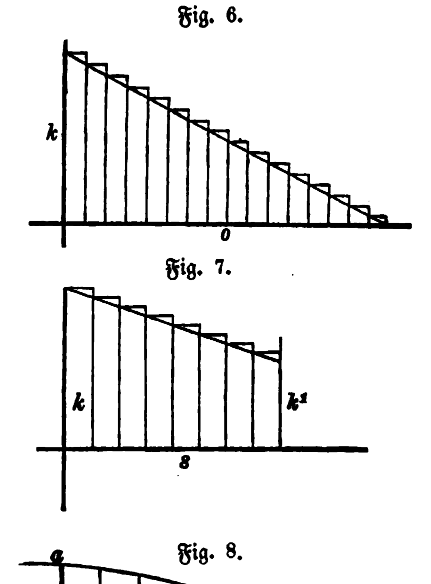


Fig. 6. Fig. 7. Fig. 8.



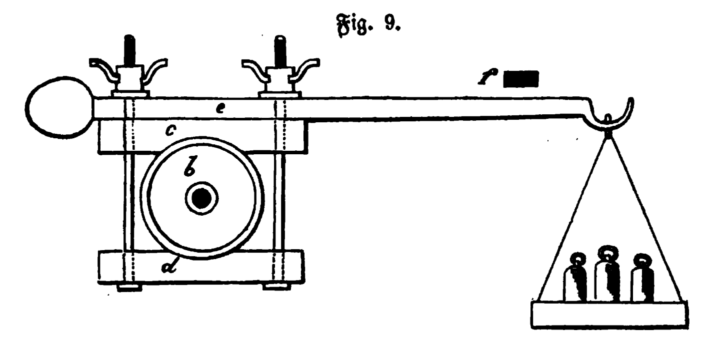
Man zeichnet die Curve ab (Fig. 8), welche durch ihre Ordinaten k das Gesetz ausdrückt und bestimmt, was gewöhnlich durch die Mittel der höheren Mathematik möglich ist, den Inhalt der Fläche abcd, so gibt derselbe die Arbeit an: andernfalls muß man die einzelnen als Rechtecke, Dreiecke oder als Paralleltrapeze zu betrachtenden Flächentheile aus den einzelnen Werthen von k und den Wegstücken s_1 s_2 .... berechnen und die Producte addiren; die Arbeit ist dann $ks = k_1 s_1 + k_2 s_2 + k_3 s_3 + \ldots$ — Aufg. 37. Die mittlere Intensität einer veränderlichen Kraft zu finden? Aufl.: Die mittlere Intensität hat diejenige constante Kraft k, welche auf dem Wege s dieselbe Arbeit leistet wie die veränderliche Kraft; also ist $ks = k_1 s_1 + k_2 s_2 + k_3 s_3 + \ldots$, woraus $k = (k_1 s_1 + k_2 s_2 + k_3 s_3 + \ldots) : s$. —

27 b. **Der Effect.** Für die theoretische Abschätzung der Arbeit einer Kraft ist die Zeit, welche zur Production der Arbeit nöthig ist, ohne Einfluß; für die practische Anwendbarkeit der Kraft ist aber diese Zeit von großer Wichtigkeit. Eine Kraft wird für die Technik um so wirkungsreicher, in je kürzerer Zeit sie eine gewisse Arbeit leistet. Die Technik legt daher bei ihren Messungen diejenige Arbeit zu Grunde, welche eine Kraft in 1 Secunde leisten kann; man nennt diese Arbeit den **Effect der Kraft**. Da nun der in 1 Sec. zurückgelegte

Weg, wie bekannt, Geschwindigkeit genannt wird, so ist der Effect einer Kraft gleich dem Product der Kraft mit der Geschwindigkeit ihres Angriffspunktes oder $E = k \cdot v$ . . . . (10)

Ist k in Kilogrammen und v in Metern gegeben, so ist kv die Zahl der in jeder Secunde geleisteten Meterkilogramme. Um nicht zu große Zahlen zu erhalten, ist man übereingekommen, die in 1 Secunde geleistete Arbeit von 75 ^{mk} eine Pferdekraft oder Pferdestärke zu nennen, weil ein Pferd bei täglich 8stündiger Arbeitszeit ungefähr diese Arbeit leisten, also in jeder Sec. 75^{kg} 1^{m} hoch oder 15^{kg} 5^{m} hoch oder 3^{kg} 25^{m} hoch heben kann. Der Effect in Pferdekräften ist demnach $N = {}^1/_{75}$ kv. — Der Ausdruck Pferdekraft ist hier nicht für den vom Pferde ausgeübten Druck oder Zug, sondern für die Arbeit oder Leistung des Pferdes gebraucht; es wäre deßhalb der von dem Verein deutscher Ingenieure vorgeschlagene Ausdruck „Pferdestärke" vorzuziehen; in demselben Sinne genommen ist eine Menschenkraft ungefähr $= {}^1/_7$ Pferdekraft. Von dem Effecte einer Kraft geht, wenn diese Kraft zum Betriebe einer Kraftmaschine verwendet wird, ein Theil für die Ueberwindung der Widerstände verloren, die in der Maschine vorhanden sind, z. B. in einer Dampfmaschine wirkt dem Dampfe auf der anderen Seite des Kolbens ein Gegendruck entgegen, alle Theile der Maschine müssen bewegt und manche sogar gehoben werden, Pumpen müssen Wasser herbeischaffen, an allen Gelenken, an den Kolben und den Liderungen der Stangen finden Reibungen statt. Zieht man alle diese Effectverluste von dem absoluten Effecte ab, so bleibt der zu äußerer Arbeit verwendbare Effect übrig, der sogenannte Nutzeffect. Den Nutzeffect einer Kraftmaschine kann man auch direct bestimmen mittels Pronys Bremse oder Bremsdynamometer. Die Kraftmaschinen setzen meist eine Walze, die Hauptwelle oder Transmissionswelle genannt, in drehende Bewegung, welche Bewegung dann weiter benutzt wird. Will man den Nutzeffect finden, so wird auf diese Welle a (Fig. 9) eine Rolle b befestigt, welche von 2 durch Schrauben zusammen-

Fig. 9.



ziehbaren Holzbacken c und d umfaßt wird. Mit dem einen Backen c ist der Hebel e fest verbunden, der an seinem langen Ende eine Wagschale trägt. Dann werden die Schrauben so fest zusammengezogen, daß die Welle nur diejenige Anzahl von Umdrehungen macht, für welche man eben den Nutzeffect finden will. Es wird dann die ganze Bremse von der Welle mitgedreht, wird aber sofort auf derselben schleifen, weil der Hebel e durch den Balken f aufgehalten wird. Der Widerstand, welchen die Maschine jetzt überwinden konnte, ist offenbar dem von ihr überwundenen Betrage der Reibung gleich, welche die Rolle jetzt auf die Holzstücke ausübt. Die Größe dieser Reibung aber kann man finden, wenn man auf die Wagschale so lange Gewichte legt, bis der Hebel e den Balken f verläßt. Dieses Gewicht p, welches vom Mittelpunkte der Welle um dessen Länge e entfernt ist, wirkt nach den Gesetzen des Hebels, wie wir später sehen werden, nicht mit seinem einfachen Betrage auf den Umfang der Rolle, der um r von dem Mittelpunkt entfernt sei, sondern mit einem im Verhältnisse dieser zwei Entfernungen vergrößerten Betrage; folglich ist die Größe der Reibung $= p\,l : r$. Multiplicirt man denselben mit der Geschw. der Welle, welche leicht aus der Umdrehungszahl n zu berechnen ist, so hat man den Nutzeffect der Maschine.

Das Pandynamometer von Hirn (1867). Denken wir uns, ein wagrechter runder Holzbalken liege in Lagern und bestehe aus lauter parallelen losen Fasern, an beiden Enden seien eiserne Ringe umgelegt, die in starke eiserne Arme übergehen; welche ebenfalls eine parallele wagrechte Lage haben mögen; wird nun der eine Arm nach oben und der andere nach unten gedreht, so nehmen die meisten Fasern eine spiralig gewundene

Gestalt an; man nennt diese Erscheinung Verwindung oder Torsion. Dieselbe Erscheinung findet auch statt, wenn der Balken starr, oder wenn er aus Eisen geformt, z. B. eine Transmissionswelle ist, und wenn an einem Ende eine Kraftmaschine z. B. eine Wasserrad drehend wirkt, während am anderen Ende ein Widerstand zu überwinden ist, z. B. Mühlsteine zu drehen sind. Der Winkel, welchen dann die beiden ursprünglich wagrechten Eisenarme mit einander machen, hängt offenbar von der Größe des Druckes ab, den das Wasserrad gegen den Widerstand ausübt; man nennt ihn Torsionswinkel. Ist es möglich, diesen Winkel zu bestimmen, so ist es auch möglich, die Größe des dazu nöthigen Druckes zu finden, indem man einfach das Wasserrad beseitigt und durch Gewichte an dem einen eisernen Arme ersetzt; diese üben denselben Druck aus wie das Wasserrad, wenn sie denselben Torsionswinkel hervorbringen. Es handelt sich also um ein Verfahren, den Torsionswinkel zu messen. Hierzu hat Hirn verschiedene Methoden eingeschlagen. Bei dem elektrischen Pandynamometer sind statt der eisernen Arme an beiden Enden der Welle Radscheiben angebracht, die aus einem Stoffe bestehen, der die Elektricität nicht leitet. In jeden Scheibenrand ist jedoch ein leitender Metallstreifen eingelassen, während auf jedem Rande die 2 Poldrähte je einer galvanischen Batterie schleifen; der eine Poldraht jeder Batterie geht zu der Achse einer drehbaren Trommel, während der andere den Mantel derselben berührt, der mit Blutlaugensalzgetränktem Papier überzogen ist. Die 2 leitenden Streifen und die 4 schleifenden Pole befinden sich im Ruhezustande je in derselben Horizontalen, und ebenso die beiden berührenden Trommeldrähte; dreht man nun, jedoch vor der Hand außer der Arbeit, die Welle, bis die Pole auf den Metallstreifen liegen, so sind beide Ströme in demselben Augenblicke geschlossen, sie gehen beide durch das getränkte Papier und erzeugen auf demselben durch die Zersetzung des Salzes zwei neben einander liegende blaue Punkte. Ist aber die Maschine in Arbeit, so ist die Scheibe an der Kraftmaschine gegen die an der Arbeitsmaschine etwas verdreht, und zwar ist die erste Scheibe der letzteren um den Torsionswinkel voraus; daher ist der erste Strom eher geschlossen als der zweite, der zweite blaue Punkt entsteht später als der erste. Wird nun die Registrirtrommel während der Arbeit rasch gedreht, so wird der zweite Punkt nicht mehr neben dem ersten sondern seitwärts unter oder über demselben markirt, und zwar um so weiter von demselben entfernt, je größer der Torsionswinkel ist, und je schneller die Registrirtrommel gedreht wird; hieraus läßt sich der Torsionswinkel berechnen, und durch Ersatz der Maschinen durch Gewichte läßt sich der Druck der ersteren finden. Wir übergehen die Einrichtungen, welche den Abstand der beiden Punkte noch mehr vergrößern, sowie die übrigen Anordnungen, die Hirn noch zum Bestimmen des Torsionswinkels getroffen hat.

Zur Bestimmung des absoluten Effectes eines Motors kann man auch Regniers Dynamometer (Fig. 4) benutzen. Drückt z. B. ein Mensch an einem Hebel, um eine Maschine zu drehen, so findet man den Effect desselben, indem man zuerst durch das Dynamometer seine Muskeldruckkraft bei der betreffenden Anstrengung aufsucht und dann seinen in einer gewissen Zeit zurückgelegten Weg mit der Zahl der Secunden dividirt und die so erhaltene Geschwindigkeit mit jenem Drucke multiplicirt.

28 **Aufg. 38.** In einem Wasserfalle stürzen in jeder Sec. 1500^{kg} Wasser von einer Höhe von 5^{m} herab; welches ist der absol. Effect des Wasserfalles? Aufl.: $E := 1500 . 5 = 7500^{mk}$ per Sec. $= 100$ Pferden $= 100^{e}$. — A. 39. Wie groß ist der Effect von 2 Pferden, welche einen Wagen von 1500^{kg} Gewicht in 2 Stunden 4 M. weit auf ebener Straße ziehen? Aufl: $1/30 . 1500 . 7420 . 4 : 2 . 60 . 60 = 206^{mk} = 2^{2}/3^{e}$ ca. — A. 40. Welchen Effect leistet ein Mann von 80^{kg} Gewicht, der 10 Stunden lang zu Fuße geht und dabei 5 M. zurücklegt? Aufl: $80 (7420 . 5 : 0,6) 0,02 : 36000 =$ ca $3^{mk} = 1/25^{e}$. — A. 41. Welchen Effect leistet dieser Mann, wenn er in diesen 10 Stunden einen Berg von 1 M. Höhe besteigt? Aufl. $16^{1}/2 + 3 = 19^{1}/2^{mk} = 1/4^{e}$. — A. 42. Wenn in den Tagen vor der Schlacht bei Sedan die deutschen Soldaten, deren Kriegsausrüstung 35^{kg} wiegt, täglich in 6 Stunden 4 M. zurücklegten und dabei durchschnittlich 10 Hügel von 300^{m} zu überschreiten hatten, wie groß war dann ihr Effect, wenn der Mann durchschnittlich 65^{kg} wog? Aufl. $[(65 + 35) (7420 . 4 : 0,06) 0,02 + 100 . 3000] : 21600 = 19^{mk} = 1/4^{e}$. — A. 43. Wenn ein Schmied einen Hammer von 10^{kg} alle 2 Sec. 1 mal 80^{cm} hoch hebt und beim Niederschlagen auch einen Druck von 6^{kg} ausübt, welchen Effect bringt er bei 8 stündiger Arbeit hervor, vorausgesetzt, daß nach je 5 Min. eine Pause von 5 Min. stattfindet? Aufl: $16 . 0,8 . 150 : 300 = 6,4^{mk}$. — A. 44. Wenn ein Rammklotz von 500^{kg} per Min. 20 mal auf eine Höhe von 2^{m} gehoben werden soll und die Arbeiter nicht höher als zu einem Effect von 8^{mk} in Anspruch genommen werden, wie viele Leute sind dann anzustellen? Aufl: $500 . 2/3 = 8n$; daraus $n = 31$. — A. 45. Welchen Effect bedarf ein Eisenbahnzug von 100^{t} mit 12^{m} Geschwindigkeit? Aufl: $100000 . 1/200 . 12 = 6200^{mk} = 80^{e}$. — A. 46. Welcher Effect ist nöthig, um mittels einer Pumpe per Min. 2 Ohm $= 320^{l}$ Wasser aus einer Tiefe von 15^{m} zu heben, wenn

die Hindernisse der Bewegung der Hälfte der Last gleich kommen? Aufl: $(^3/_2 . 320 . 15) : 60 = 120^{mk} = 1{,}6^e$. — A. 47. Wie groß ist der absolute Effect einer Dampfmaschine, wenn der Dampf eine Spannung von 4 Atmosphären hat, und wenn der 40^{cm} breite Kolben in jeder Sec. $1{,}5^m$ zurücklegt? Aufl: 1 Atmosphäre übt auf 1^{qcm} einen Druck von $1{,}0328^{kg}$ aus; also ist der Druck auf den Kolben $= 20^2 . 3{,}1416 . 4 . 1{,}0328 = 5191^{kg}$; daher der Effect $= 5191 . 1{,}5 = 7785^{mk} = 104^e$. — A. 48. In einer Rudelmühle geht ein Pferd, das nach einem Dynamometer-Versuch durchschnittlich einen Druck von 30^{kg} ausübt, an einem Hebel von 5^m Länge in einer Stunde 120 mal im Kreise; welchen Effect producirt das Pferd? Aufl: $E = 31{,}4^{mk}$.

29 c. Die lebendige Kraft (Leibnitz 1686). Die dritte Kraftwirkung ist die lebendige Kraft. Eine Kraft kann nämlich nicht blos durch Ueberwindung von Gegenkräften oder Widerständen Arbeit leisten, sondern ihre Wirkung kann auch darin bestehen, daß sie eine vollkommen freie, ruhende Masse in Bewegung versetzt, oder, was dasselbe ist, daß sie die Geschwindigkeit einer schon bewegten Masse vergrößert oder verkleinert, oder daß sie neben der Ueberwindung eines Widerstandes auch noch Geschwindigkeit hervorbringt. Ist nun durch eine Kraft eine Masse in Bewegung versetzt, so ist die bewegte Masse selbst im Stande, Druck und Zug hervorzubringen. Sie ist jedoch kein todter, ruhender Druck oder Zug, sondern sie vermag auf jedem Punkte eines gewissen Weges Druck oder Zug auszuüben. Die bewegte Masse enthält also das, was dem ruhenden Druck oder Zug fehlt, um arbeitsfähig zu sein, die Bewegung verbunden mit Druck oder Zug. Die bewegte Masse enthält arbeitsfähige Kraft, die man deßhalb im Gegensatze zu dem wirkungslosen ruhenden Druck oder Zug lebendige Kraft nennt. **Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist die Leistungsfähigkeit, welche die bewegte Masse durch ihre Bewegung enthält.** Da die in der Technik angewandten Naturkräfte aus bewegten Massen bestehen, so ist es wichtig, die Größe der Leistungsfähigkeit einer bewegten Masse berechnen, die lebendige Kraft messen zu können; und da die neuere Physik alle arbeitsfähigen Kräfte als Massenbewegungen auffaßt, so ist auch hier das Messen der lebendigen Kraft einer Massenbewegung von wesentlicher Bedeutung.

Die lebendige Kraft einer bewegten Masse wird gemessen durch das halbe Product der Masse mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. $L = {}^1/_2 mv^2$ . . . . (11)

Wenn eine vollkommen freie, ruhende Masse in Bewegung versetzt wird, so hat die wirksame Kraft nur die Trägheit der Masse zu überwinden, das passive Verharren der trägen Masse in ihrem Zustande. Hierbei tritt nicht, wie bei der schon besprochenen Arbeit, ein Widerstand, eine Gegenkraft von bestimmter Größe auf; denn jede Kraft, auch die kleinste, ist im Stande, die freie Masse zu bewegen, wobei allerdings die erzielte Geschwindigkeit der Kleinheit der Kraft entspricht. Da indessen für eine bestimmte Beschleunigung a der Masse m die Kraft ma nöthig ist, so könnte man nach dem Satze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft“ die Trägheit als einen Widerstand (vis intertiae) von der Größe ma auffassen, wofür auch der Versuch an Poggendorffs Fallmaschine spricht, da dort durch die Trägheit das Gewicht um den Betrag ma vermehrt oder vermindert wird.

Daß eine bewegte Masse Wirkungen ausüben kann, ist eine oft erwähnte und oft beobachtete Thatsache; ein geworfener Stein kann eine Fensterscheibe zersplittern, eine losgeschossene Kugel kann Bretter oder Mauern durchlöchern, ein Eisenbahnzug kann nach dem Dampfabschlusse sich selbst noch Kilometer weit fortziehen, der Wind ist nichts anderes als bewegte Luft. Demnach enthält eine bewegte Masse eine Leistungsfähigkeit. Diese besteht jedoch nicht in einem todten Druck, wie ihn ein auf dem Boden liegendes Gewicht ausübt, sondern die bewegte Masse übt einen gewissen Druck auf jedem Punkte eines gewissen Weges aus; die Kugel zerstört die Festigkeit des Brettes in der ganzen Dicke desselben; der Eisenbahnzug überwindet die Widerstände auf jedem Punkte eines Kilometer langen Weges; ein Sturm trägt seine zerstörenden Wirkungen Meilen weit. Die Leistungsfähigkeit einer bewegten Masse ist demnach Druck oder Zug auf jedem Punkte eines gewissen Weges, die lebendige Kraft ist Arbeit.

Zum Beweise unseres Satzes (11) müssen wir demnach die lebendige Kraft messen, indem wir den in der bewegten Masse enthaltenen Druck mit dem Wege multipliciren.

Der Druck einer bewegten Masse kann allerdings ein höchst verschiedener sein; wir wählen denjenigen aus, für welchen wir den entsprechenden Weg angeben können. Die Kraft, welche der Masse m in der Zeit t ihre Geschwindigkeit v ertheilte, war nach bekannten Sätzen $mv : t$; nach dem Princip „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" mußte die Masse hierbei denselben Gegendruck $mv : t$ leisten, was auch unsere Versuche an Poggendorffs Fallmaschine bestätigen. Diesen Druck leistete die Masse während der ganzen Zeit t, in welcher sie ununterbrochen der Kraftwirkung ausgesetzt war; eine solche Masse erhält aber eine beschleunigte Bewegung und legt nach Fl. (3) den Weg $\frac{1}{2}at^2$ zurück. Multipliciren wir diesen Weg mit jenem Drucke, so erhalten wir die Leistungsfähigkeit oder lebendige Kraft $L = (mv:t) . \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2}mv . at = \frac{1}{2}mv^2$, da at nach Fl. (2) nichts anderes als die Geschwindigkeit v ist; die lebendige Kraft ist also $L = \frac{1}{2}mv^2$.

Dieser Ausdruck gibt uns die Leistungsfähigkeit, die Wucht oder den Schwung, die Energie einer Bewegung an. Wenn die Kräfte der Natur aus Massenbewegungen bestehen, so ist diese Stärke der Bewegung, die lebendige Kraft das wahre Maß der Kräfte. Wir sind durch dieses Maß demnach nicht nur näher an das Wesen der Kräfte herangetreten, sondern sind durch dasselbe auch in Stand gesetzt, sie in ihrer Wesenheit mathematischen Betrachtungen zu unterwerfen, und gelangen hiermit, wie es immer bei der Erkenntniß des Wesens eines Gegenstandes der Fall ist, zu Naturgesetzen, die wegen der Allverbreitung der Naturkräfte zu allgemeinen Grundgesetzen führen, welche das ganze Weltall im Großen und Kleinen betreffen.

30 **Erster Satz über die lebendige Kraft.** Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist gleich der Arbeit derjenigen Kraft, welche der Masse die Bewegung ertheilte.

Die Kraft, durch welche eine lebendige Kraft hervorgebracht wird, kann diese Leistung nicht im Ruhezustande bewirken, ihr Träger muß vielmehr ebenfalls in Bewegung sein; denn die bewegte Masse würde, wenn der Träger der Kraft in Ruhe wäre, durch ihre Bewegung dem Sitze der Kraft ausweichen, wodurch die Wirkung derselben unmöglich würde. Man könnte zwar hiergegen einwenden, daß die Anziehung der Erde, die einen Stein zum Fallen bringt, hierbei nicht in Bewegung sei, sondern ihren ruhenden Sitz in der Erde habe; bei diesem Einwande würde man aber vergessen, daß der Ausdruck „Anziehung der Erde" nur ein Nothbehelf für unsere unvollkommene Einsicht in den Sachverhalt ist, und daß aller Wahrscheinlichkeit nach der Sitz der das Fallen bewirkenden Ursache nicht die Erde, sondern ein außerhalb der Erde nach derselben hin stoßendes Agens ist. Selbst aber auch, wenn man bei der Anziehung bleiben will, so ist doch nicht zu verkennen, daß die eigentlich treibende Fallkraft nicht eine isolirte Anziehung der Erde, sondern das aus der gegenseitigen Anziehung von Erde und Stein hervorgehende Gewicht des Steines ist, das doch offenbar seinen Sitz im Steine hat und sich beim Fallen fortwährend nach der Erde zu bewegt; also ist auch hier, wie überall, der Träger der Kraft, welche eine Bewegung hervorbringt, in Bewegung begriffen. Die Massenbewegung, die lebendige Kraft, wird nur durch Arbeit bewirkt, und diese Arbeit wird gefunden, indem man die Kraft k mit dem Wege s multiplicirt. Die Kraft aber, welche der Masse m in der Zeit t die Geschwindigkeit v verschafft, ist nach Fl. (7) bekanntlich $k = mv : t$; der hierbei von dem Angriffspunkte der Kraft k zurückgelegte Weg ist $s = \frac{1}{2}at^2$. Das Product dieser beiden Gleichungen ist $ks = \frac{1}{2}(mv : t) . at^2 = \frac{1}{2}mv . at$. Da nun nach Fl. (2) $v = at$ ist, so ergibt sich $ks = \frac{1}{2}mv^2$; also ist die Arbeit ks der Kraft k, welche der Masse m die Geschwindigkeit v ertheilt, gleich der lebendigen Kraft dieser Masse.

In anderen Fällen, wo eine Kraft eine Gegenkraft, einen Widerstand überwindet, wird die von der Kraft producirte Arbeit durch den Widerstand aufgezehrt oder consumirt, die producirte Arbeit geht in die vom Widerstande consumirte Arbeit über; man darf aber nicht aus dem Ausdrucke „consumirt" schließen, daß die Arbeit hierbei verschwunden, vernichtet wäre. Sie bleibt vielmehr, wie wir später betrachten werden, vollkommen erhalten, ganz wie es in dem eben betrachteten Falle geschieht, bei welchem die Arbeit nur die Trägheit zu überwinden hat, und dabei in lebendige Kraft übergeht. Man kann sich indessen hier ebenfalls vorstellen, daß die von der Kraft producirte Arbeit von der trägen Masse consumirt worden und in einen gleichen Betrag von lebendiger Kraft dieser Masse verwandelt worden sei.

Nachweise für diesen Satz lassen sich aus den Fallerscheinungen gewinnen. Wenn eine 3fache Masse zu Boden fällt, so hat diese die 3fache lebendige Kraft; diese ist also in demselben Verhältnisse gewachsen, wie die den Fall bewirkende Arbeit ks, da die Kraft k, das Gewicht, in der 3fachen Masse auch 3mal so groß ist. Wird die Geschwindigkeit eine 3fache, so wird die lebendige Kraft 9mal so groß; sie ist also in demselben Maße gewachsen, wie die Arbeit ks; denn die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers ist nach

Gl. (4) $= \sqrt{(2gs)}$, wird also nur dann die 3fache, wenn der Weg s neun mal so groß wird, wenn also die Arbeit ks die neunfache geworden ist.

Wirkt auf eine andere Masse m′ die Kraft k′ auf demselben Wege s, so erhält die Masse eine andere Geschwindigkeit v′ und es gilt die Gl. $k's = \frac{1}{2} m'v'^2$. Durch Division der obigen Gl. durch diese entsteht die Proportion $ks : k's$ oder $k : k' = \frac{1}{2} mv^2 : \frac{1}{2} m'v'^2$. Wirken demnach auf einen Körper zwei Kräfte auf gleichen Wegen, so verhalten sich die Kräfte wie die erzeugten lebendigen Kräfte. Leibnitz wollte diesem Gedankengange gemäß die Kräfte überhaupt durch die von ihnen erzeugten lebendigen Kräfte gemessen haben. Descartes und seine Anhänger vertheidigten dagegen die Proportion $k : k' = mv : m'v'$. Diese gilt jedoch nur unter Voraussetzung gleicher Zeiten, da nur dann aus 2 Ausdrücken von der Form $k = mv : t$ die Größe t durch Division verschwindet. Es verhalten sich demnach 2 gleich lange wirkende Kräfte, z. B. 2 momentane Kräfte wie die betreffenden Producte mv; man nennt dieses Product die Größe oder Quantität der Bewegung, da offenbar um so mehr Bewegung vorhanden ist, je mehr Masse sich bewegt und je größer die Geschwindigkeit derselben ist. Wenn demnach Kräfte durch gleiche Zeiten wirken, so verhalten sich die Kräfte wie die erzeugten Quantitäten der Bewegung. Wenn z. B. Pulver in einer Kanone entzündet wird, so wirkt der Druck der Pulvergase mit gleicher Kraft auf die Kugel und die Kanone; es muß folglich mv in der Kanone mit Lafette ebenso groß sein wie in der Kugel, und daher die Geschwindigkeit der Kanone in demselben Maße hinter der der Kugel zurückbleiben, als ihre Masse größer ist als die Masse der Kugel. Daß das Geschütz ebenfalls eine Geschwindigkeit hat, erfährt jeder Schütze durch den Stoß des Kolbens und jeder Kanonier durch den Rückgang der Kanone. Dieses Beispiel weist besonders eindringlich darauf hin, daß wohl die Quantität der Bewegung oder auch der Druck durch mv gemessen werden kann, nicht aber die Wirkung, die Arbeit; denn die Arbeit der Kugel ist doch eine unvergleichlich größere als die der Kanone, obwohl in beiden dasselbe mv ist; die Arbeit in der Kugel ist ihre lebendige Kraft und diese ist in der Kugel in dem Maße bedeutender, als ihre Geschwindigkeit diejenige der Kugel übersteigt, da sie nicht durch mv, sondern durch $\frac{1}{2} mv^2$ gemessen wird.

Wenn eine Kraft eine vollkommen freie Masse in Bewegung versetzt, und wenn, wie eben bewiesen, die lebendige Kraft der freien Masse dann gleich der Arbeit jener bewegenden Kraft ist, so kann diese lebendige Kraft dann vollkommen jene Arbeit ersetzen; sie bietet dann aber den vortheilhaften Unterschied gegen jene Arbeit dar, daß sie auf einmal, in einem Momente leisten kann, was jene Kraft während ihres längeren Weges, in längerer Zeit erst hervorbrachte. Man nennt daher die lebendige Kraft auch angesammelte Arbeit. Schieben wir z. B. einen leicht beweglichen Wagen auf einer glatten Bahn fort, so sammelt sich der Theil unserer Arbeit, der nicht zur Ueberwindung der Hindernisse verzehrt wird, in Form von lebendiger Kraft in dem Wagen an, und derselbe vermag dann einen anderen Wagen fortzustoßen. Die Arbeit des Dampfes in einem Bahnzuge, die nicht zur Ueberwindung der Hindernisse verwendet wird, sondern zur Vergrößerung der Geschwindigkeit, sammelt sich nach und nach in demselben zu lebendiger Kraft, die dann im Stande ist, einen anderen Wagenzug zu zertrümmern, oder den eigenen Zug noch längere Zeit fortzuschleppen. Die Arbeit der Pulvergase sammelt sich im Gewehrlaufe in der Kugel als lebendige Kraft, die dann auf einmal eine mächtige Wirkung entwickeln kann. Bei einem fallenden Körper, z. B. bei einem Rammklotze wird die Arbeit des Herabtreibens durch das Gewicht des Körpers selbst verrichtet; sie sammelt sich im Körper zu lebendiger Kraft, die dann beim Aufschlagen die ganze Arbeit auf einmal wirksam machen kann. Immer ist die lebendige Kraft gleich der ganzen Arbeit, die nöthig war, um dem Körper seine Bewegung zu verleihen, sie ist die angesammelte Arbeit. Wenn daher ein Motor, wie z. B. fallendes oder fließendes Wasser durch seine Massenbewegung wirksam ist, so kann seine Arbeit ebenso wohl durch die Arbeit der Kraft, welche die Bewegung hervorbrachte, als durch die ihr gleiche lebendige Kraft der Bewegung, also ebenso wohl durch ks wie durch $\frac{1}{2} mv^2$ gemessen werden. Fällt z. B. eine Wassermasse von 80^{kg} 100^m hoch herab, so ist bekanntlich nach der ersten Messungsart ihre Arbeit $ks = 8000^{mk}$. — Dieselbe Arbeit finden wir aber auch, wenn wir die lebendige Kraft der Masse aufsuchen; denn m ist in diesem Falle gleich $80 : 10 = 8$, und v ist nach Gl. (4) $= \sqrt{(2gs)}$, also $v^2 = 2gs = 2 . 10 . 100 = 2000$; daher ist die lebendige Kraft $\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} . 8 . 2000 = 8000^{mk}$, nach beiden Methoden dasselbe Resultat. Man kann also die Arbeit jedes Motors, der durch seine Bewegung Arbeit zu leisten vermag, nach 2 Methoden bestimmen, vorausgesetzt, daß man seine Bewegung kennt. Noch schärfer erhellt dies aus dem zweiten Satze über die lebendige Kraft.

Zweiter Satz über die lebendige Kraft. Die lebendige Kraft einer bewegten Masse ist gleich der Arbeit, welche diese Masse leisten kann, wenn sie hierbei ihre Bewegung ganz verliert. 31

Die Thatsache, daß eine bewegte Masse Arbeit leistet, ist schon durch mancherlei Beispiele festgestellt. Sie leistet Arbeit, indem sie im Stande ist, gegen einen gewissen Widerstand k einen gleichen Gegendruck auszuüben und denselben auf einem gewissen Wege s zu überwinden; die hierbei geleistete Arbeit ist = ks. Indem sie der entgegenwirkenden Masse Bewegung mittheilt, verliert sie von ihrer eigenen Geschwindigkeit, bis dieselbe endlich = 0 ist. Welchen Betrag von Geschwindigkeit sie verliert, dies hängt von der Größe des Widerstandes k ab. Steht uns ein Beispiel zu Gebote, daß die Masse m durch irgend eine bestimmte Kraft in 1 Secunde eine bestimmte Geschwindigkeit verliert, so können wir auch den Verlust unserer Masse m durch die Kraft k auffinden. Ein solches Beispiel bietet die Erde, indem jede senkrecht aufsteigende Masse in jeder Secunde durch die Anziehung der Erde, welche durch das Gewicht p des Körpers gemessen wird, die Geschwindigkeit $g = 10^m$ verliert. Wenn eine Masse durch die Kraft p die Geschwindigkeit g in 1 Secunde verliert, so verliert sie durch die Kraft k in 1 Secunde die Geschwindigkeit $a = (g : p) k$, und in t Secunden die Geschwindigkeit $(g : p) kt$. Verstehen wir nun unter t die Zeit, in welcher unsere bewegte Masse ihre ganze Geschwindigkeit v verliert, so ist $v - (g : p) kt = 0$, woraus $k = pv : gt$. Dieser Ausdruck gibt die Größe des Druckes an, den unsere bewegte Masse in der ganzen Zeit t ausübt, während ihre Geschwindigkeit in jeder Secunde um einen bestimmten Betrag a abnimmt; sie hat während dieser Zeit eine verzögerte Bewegung, legt also bis zum Stillstande nach Formel (5) den Weg $s = v^2 : 2a$ zurück. Multipliciren wir den Druck k mit dem Wege s, so erhalten wir die Gleichung $ks = (pv : gt) . (v^2 : 2a) = \frac{1}{2}(p : g) (v^3 : at)$. Da nun $p : g = m$ und $at = v$, so ist $ks = \frac{1}{2}mv^2$.

Wenn eine bewegte Masse Arbeit leistet und ihre Geschwindigkeit nicht ganz verliert, so ist diesem Satze gemäß die geleistete Arbeit nur gleich der verschwundenen lebendigen Kraft.

Nachweise für den zweiten Satz lassen sich mancherlei auffinden. Wenn eine Kugel von 250^m Geschwindigkeit 3 Bretter durchbohrt, so durchlöchert eine gleiche Kugel von 500^m Geschwindigkeit 12 gleiche Bretter; hat aber die zweite Kugel dieselbe Geschwindigkeit, jedoch bei gleicher Größe das doppelte Gewicht, wie die erste, so durchbohrt sie 6 Bretter; die geleistete Arbeit wächst also direct mit der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit. — Bewegt sich ein Körper senkrecht aufwärts, so leistet er Arbeit, indem er durch seine lebendige Kraft sein Gewicht bis zu einer gewissen Höhe hebt. Ein doppelt so schwerer Körper hat die doppelte Masse, also auch die doppelte lebendige Kraft; er leistet aber auch die doppelte Arbeit, indem er das doppelte Gewicht zu gleicher Höhe treibt. Wie schon früher (in 16) erwähnt, ist die Steighöhe eines solchen Körpers $= c^2 : 2g$; ein senkrecht aufsteigender Körper von 10, 20, 30, 40^m Geschwindigkeit erreicht daher Höhen von 5, 20, 45, 80^m; der 2te, 3te, 4te Körper hat eine 2, 3, 4 mal so große Geschwindigkeit wie der erste, also eine 4, 9, 16fache lebendige Kraft, leistet aber auch die 4, 9, 16fache Arbeit, indem er sich selbst zu 4, 9, 16facher Höhe treibt. Auch hier finden wir, daß die geleistete Arbeit in geradem Verhältnisse mit der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, also mit der lebendigen Kraft wächst. Ja hier tritt die Gleichheit der von der lebendigen Kraft geleisteten Arbeit mit der lebendigen Kraft deutlich auf. Der erste Körper hat, wenn seine Masse = m, die lebendige Kraft $\frac{1}{2} m . 10^2 = 50m$; seine Arbeit ist, da er 5^m hoch steigt $= 5p$, wenn p sein Gewicht bedeutet; da aber $p = 10m$, so ist die Arbeit $= 50m$. Ebenso einfach ergibt sich die Gleichheit von lebendiger Kraft und Arbeit bei den übrigen Körpern.

Dieser Satz läßt leicht erkennen, daß eine und dieselbe bewegte Masse je nach dem Widerstande, der ihr begegnet, den verschiedensten Druck ausüben kann, natürlich auf verschiedenen Wegen. Ein Körper von 30^{kg} Gewicht und 4^m Geschwindigkeit hat eine lebendige Kraft $= \frac{1}{2} . 3 . 4^2 = 24^{mk}$, kann also eine Arbeit von 24^{mk} leisten, vermag folglich einen Druck auszuüben von 24^{kg} auf einem Wege von 1^m, oder von 12^{kg} auf 2^m, oder von 8^{kg} auf 3^m, oder von 6^{kg} auf 4^m u. s. w., aber auch 240^{kg} auf 1^{dm}, 2400^{kg} auf 1^{cm}, 24000^{kg} auf 1^{mm} u. s. w. Hierauf beruht die verhältnißmäßig gewaltige Wirkung, die eine bewegte Masse im Vergleiche zu ihrem ruhenden Gewichte ausüben kann. Eine Büchsenkugel von 20^g Gewicht kann vermöge ihres Gewichtes wohl allmälig durch eine weiche Masse sinken, bleibt aber ruhig auf einem festen Körper liegen, während sie mit

einer Geschwindigkeit von 500m eine lebendige Kraft von 250mk enthält, also z. B. eine Festigkeit von 5000kg auf einem Wege von 5cm überwinden, tief in Holz, Stein eindringen, Knochen und noch tiefer Fleisch durchbohren kann. Mit dieser Eigenschaft der lebendigen Kraft verstehen wir die Wirkungen des Schießens, Schleuderns, Werfens, Stoßens u. s. w.; in allen solchen Vornahmen sammeln wir in einem Körper Arbeit in Form von lebendiger Kraft an und lassen dieselbe dann Festigkeiten oder andere große Widerstände überwinden. Ein geschwungener Life-preserver oder Todtschläger kann leicht eine Hirnschale zerschmettern, während ein Stockknopf viel weniger gefährlich wirkt, da in dem ersteren die lebendige Kraft wegen des größeren Gewichtes und daher auch der größeren Masse des Bleiknopfes 10 bis 20 mal so groß werden kann als im Stockknopfe. Wird aber ein Stein mit einer langen Schleuder oder ein Stockknopf von einem kräftigen Arme geschwungen, so kann er durch eine 3fache Geschwindigkeit schon eine 9fache lebendige Kraft erhalten und daher auch die Stirne eines Riesen durchdringen. Wie bedeutend der Unterschied zwischen dem ruhenden und dem bewegten Gewichte ist, tritt besonders deutlich hervor, wenn wir berechnen, wie groß das Gewicht sein müßte, das auf einen Nagel gelegt, diesen ebenso tief eintreibt, als ein Hammer von 1kg Gewicht, der mit einer Geschwindigkeit von 10m auftrifft und den Nagel 1mm tief einschlägt. Die lebendige Kraft des Hammers ist $= {}^1/_2 \,.\, {}^1/_{10} \,.\, 10^2 = 5^{mk}$; die durch sein Gewicht beim Eindringen geleistete Arbeit ist $1 \,.\, {}^1/_{1000} = 0{,}001^{mk}$; daher die ganze Arbeit des Hammers $= 5{,}001^{mk}$. Soll nun das unbekannte nur aufgelegte Gewicht x dieselbe Wirkung haben, so muß seine Arbeit $x \,.\, 0{,}001$ gleich der lebendigen Kraft des Hammers sein; also entsteht die Gleichung $x \,.\, 0{,}001 = 5{,}001$, woraus $x = 5001^{kg}$. Der geschwungene Hammer von 1kg bringt also dieselbe Wirkung hervor, wie ein 5001mal so großes aufgelegtes Gewicht. — Das Einrammen der Pfähle wäre durch ruhende Gewichte unmöglich, weil man dieselben weder auf- noch anbringen könnte, während dem mächtigen Drucke, welchen die lebendige Kraft des Rammklotzes ausüben kann, diese Arbeit leicht gelingt.

Die Thatsache, daß eine Arbeit, die keinen oder einen zu geringen Widerstand zu überwinden hat, sich als lebendige Kraft in leicht beweglichen Massen ansammelt, und daß diese lebendige Kraft dann wieder Arbeit leisten kann, hat eine wichtige Anwendung in den Schwungrädern der Dampf- und sonstigen Kraftmaschinen gefunden. Der Dampf kann, wie aus der späteren Betrachtung der Dampfmaschine erhellen wird, nicht ununterbrochen wirken und während seiner Wirkungszeit auch nicht gleichmäßig wirken; außerdem setzen die Werke, die von einer Dampfmaschine getrieben werden, derselben nicht immer denselben Widerstand entgegen. Um die hieraus sich ergebenden Unregelmäßigkeiten des Ganges der Maschine zu beseitigen, ist an derselben ein Rad von großer Masse angebracht, dessen Hauptmasse in dem Schwungringe, dem äußeren Randtheile des Rades, weit von der Achse entfernt, sich befindet, welche deßhalb eine große Geschwindigkeit annehmen kann. In dieser Masse sammelt sich zur Zeit der kräftigeren Dampfwirkung und der geringeren Widerstände die Arbeit des Dampfes an, und erhält als lebendige Kraft zur Zeit der schwachen oder ganz aufhörenden Dampfwirkung den Gang der Maschine und führt sie über Zeiten größerer Widerstände hinaus.

Besonders wichtig ist der zweite Satz dadurch, daß mittels desselben alle Fragen gelöst werden können, die sich in der Technik über einen Motor darbieten, dessen Kraft in einer Massenbewegung beruht; denn aus der Gleichung ${}^1/_2\, mv^2 = ks$ läßt sich immer eine der vier auftretenden Größen oder ihrer Verbindungen finden, wenn die übrigen bekannt sind. Durch Auflösung der Gleichung nach k ($k = {}^1/_2\, mv^2 : s$) läßt sich der Widerstand berechnen, den der Motor auf der Strecke s bezwingen, oder der Druck, den derselbe auf diesem Wege ausüben kann, oder der Widerstand, welcher im Stande ist, die lebendige Kraft auf diesem Wege aufzuzehren. Durch Auflösung der Gl. nach s ($s = {}^1/_2\, mv^2 : k$) ergibt sich der Weg, auf welchem die lebendige Kraft den Druck k ausübt oder den Widerstand k überwindet. Durch Auflösung nach v ($v = \sqrt{(2ks : m)}$) findet man die Geschw., die eine gegebene Masse besitzen muß, um einen verlangten Druck ausüben, einen bekannten Widerstand überwinden zu können. Am wichtigsten ist natürlich die directe Anwendung des Satzes zur Berechnung der Arbeit, die irgend ein aus bewegter Masse bestehender Motor leisten kann. In den Aufgaben zu diesem Abschnitte sind Aufgaben dieser Art, deren Lösung wir dem Studirenden besonders empfehlen. Wegen der Wichtigkeit des Begriffes der lebendigen Kraft möge ein Beispiel ausführlicher betrachtet werden. Ein Eisenbahnzug läuft auf der Bahn noch eine gewisse Strecke fort, wenn der Dampfzufluß aufgehört hat; die lebendige Kraft überwindet also auf horizontaler Bahn die Widerstände der Reibung und der Luft, welche nach aller Erfahrung durchschnittlich ${}^1/_{200}$ des Gewichtes des Zuges betragen. Wiegt nun ein Zug 80t, so ist bei 12m Geschw. die lebendige Kraft desselben $= {}^1/_2\, (80000 : 10)\, 12^2$. Bezeichnen wir den gesuchten Weg, auf welchem diese lebendige Kraft den Widerstand ${}^1/_{200} \,.\, 80000$ überwinden kann, mit x, so ist die zu leistende Arbeit

$= {}^1/_{200} . 80000x$. Da die lebendige Kraft des Zuges nach dem zweiten Satze gleich dieser Arbeit ist, so erhalten wir die Gleichung ${}^1/_{200} . 80000 x = {}^1/_2 (80000 : 10) 12^2$, woraus $x = 1440^m$. Ein Eisenbahnzug von 12^m Geschw. vermag also durch seine eigene lebendige Kraft noch 1440^m weit zu laufen.

Noch wichtiger als im practischen Leben ist der Begriff der lebendigen Kraft in der reinen Theorie der neueren Physik geworden, insbesondere zur Erkenntniß des Wesens der Kräfte. Zum Beweise hierfür möge eine Stelle aus Redtenbachers Principien der Mechanik dienen, die schon zu einer Zeit (1852) erschienen, als einige hervorragende Anwendungen jenes Begriffes noch nicht einmal durchgedrungen waren. „Einzig und allein durch diese Begriffe", sagt Redtenbacher, „sind wahre, das innere Wesen der Erscheinungen berührende Erklärungen der Thatsachen möglich, indem alle Erscheinungen auf Wechselthätigkeiten der Körper und ihrer Theile beruhen, deren Größe nur allein vermittelst der Begriffe von Arbeit und von lebendiger Kraft verstanden werden kann. Es scheint sogar, daß durch diese Begriffe die Mechanik mit der Physiologie in einen engern Zusammenhang gebracht werden kann, denn es ist Thatsache, daß alle Einwirkungen auf unser Nervensystem nach lebendigen Kräften zu beurtheilen sind. Die Intensität aller Empfindungen richtet sich theils nach der specifischen Reizbarkeit des Nervensystems eines Individuums, theils nach der lebendigen Kraft, mit welcher auf die Nervensubstanz eingewirkt wird. Für ein bestimmtes Individuum ist die Intensität der Empfindung des Schalles der lebendigen Kraft des schwingenden Lufttheilchens, die Intensität der (strahlenden) Wärme und der Lichtempfindung der lebendigen Kraft des schwingenden Aetheratoms proportional, und diese Thatsachen scheinen sich auch sehr natürlich zu erklären, weil diese lebendigen Kräfte die Wirkungen ausdrücken, durch welche die Nervensubstanz gereizt wird." Die folgenden Abschnitte werden noch weitere Beweise für die Wichtigkeit des Begriffes der lebendigen Kraft bringen und zeigen, daß die lebendige Kraft der Grundbegriff der neuern Physik ist.

32 Aufg. 49. Ein Zug von 100^t (à 1000^{kg}) und 10^m Geschw. soll nach 400^m zur Ruhe kommen; welcher Widerstand muß durch das Bremsen erreicht werden? Aufl.: $k = 1250^{kg} = {}^1/_{80}$ der Last. — A. 50. Welche Geschwindigkeit verliert der Zug in jeder Sec. und wann kommt er zur Ruhe? Aufl.: Nach Fl. (8) ist $a = k : m = 1250 : 10000 = {}^1/_8{}^m$; daher $t = c : a = 80$ Sec. — A. 51. Ein Zug von 80^t und ${}^1/_{250}$ Widerstand kommt nach 1800^m zur Ruhe; welche Geschw. hatte derselbe? Aufl.: $v = 12^m$. — A. 52. Wie groß ist die lebendige Kraft eines 15^{cm}-Geschosses? Aufl.: $250\,000^{mk}$. — A. 53. Wie groß ist der Druck im Geschützrohre, wenn dasselbe $2{,}5^m$ lang ist? Aufl.: $ks = 250\,000$; hieraus $k = 100\,000^{kg}$. — A. 54. Wie groß ist der Effect des Geschützes, wenn dasselbe alle 5 Min. losgeschossen wird? Aufl.: $11^1/_9{}^e$. — A. 55. Durch einen Kanal fließt in jeder Sec. eine Wassermenge von 3^{cbm} (1^{cbm} Wasser wiegt 1000^{kg}) mit einer Geschw. von 2^m; wie groß ist die leb. Kft. und der Effect des Baches? Aufl.: $L = 600^{mk} = 8^e$; $E = 8$ Pf. A. 56. Aus einer Feuerspritze strömen per Sec. 10^l Wasser mit einer Geschw. von 20^m; wie hoch steigt es und welcher Effect ist nöthig? Aufl.: $s = c^2 : 2g = 20^m$; $E = {}^1/_2 mv^2 = 200^{mk} = 2^2/_3{}^e$. — A. 57. Ein Wagen von 300^{kg} werde mit einer Geschw. von 2^m auf einer guten Straße fortgezogen; welcher Effect ist dafür nöthig? Aufl.: $E = 300 . {}^1/_{30} . 2 + {}^1/_2 . 30 . 2^2 = 80^{mk}$. — A. 58. Welcher Effect ist beim Anlaufe des Eisenbahnzuges in A. 51 zu leisten und wie verhält sich derselbe zu dem nothwendigen Effect im Beharrungszustande, wenn dieser in 1 Min. erreicht sein soll? Aufl.: $a = 12 : 60 = {}^1/_5{}^m$; $s = {}^1/_2 at^2 = 360^m$, $ks = {}^1/_{250} . 80000 . 360 = 115200^{mk}$; $L = {}^1/_2 mv^2 = 576\,000^{mk}$; $E = (115200 + 576000) : 60 = 11520^{mk} = 153{,}6^e$; $E : E' = 153{,}6 : 25{,}6$. — A. 59. Den ersten Satz $ks = {}^1/_2 mv^2$ für den freien Fall zu beweisen? Aufl.: $k = p$; $p = m : g$; $s = v^2 : 2g$; $ks = {}^1/_2 mv^2$. — A. 60. Wie groß ist die leb. Kraft zweier Massen m und m', die sich mit der Geschw. c einander durch Anziehung nähern oder durch Abstoßung von einander entfernen? Aufl.: L von $m = {}^1/_2 m'm^2c^2 : (m + m')^2$, L von $m' = {}^1/_2 mm'^2c^2 : (m + m')^2$; die Summe $= {}^1/_2 mm'c^2 (m + m')$. — A. 61. Der Luftdruck vermag bei 0°C Quecksilber 75^{cm} hoch in einen luftleeren Raum zu drücken; nach der neueren Physik geschieht dies durch die lebendige Kraft der fortschreitenden Luftmoleküle. Wenn nun die Dichte der Luft der 10400te Theil von der des Quecksilbers ist, und wenn wir annehmen, daß $^1/_2$ der Luftmoleküle nach einer Richtung stoßend wirken, daß aber nach Clausius 37% dieser Moleküle in ihrer fortschreitenden Bewegung gehemmt werden, so fragt es sich, welche Geschw. die Moleküle haben müssen, um durch ihre leb. Kraft 75^{cm} Quecksilber heben zu können? Aufl.: ${}^1/_2 . {}^1/_2 . 0{,}63m . v^2 = {}^1/_2 . 10400 . 10m . 0{,}75$; hieraus $v = 500^m$ ca. — A. 62. Wenn die Dichte des Wasserstoffs der 14te Theil von der Luftdichte ist, und wenn angenommen wird, daß die Temperatur durch die leb. Kraft der Moleküle bedingt wird, wie groß ist dann die Geschw. der Wasserstoffmoleküle bei 0°C? Aufl.: ${}^1/_{14} . v^2 = 500^2$, woraus $v = 1870^m$ ca.

5. Eintheilung der arbeitsfähigen Kräfte in lebendige Kraft und Spannkraft, Energie der Bewegung und Energie der Lage. 33

In den letzten Abschnitten sind wir zu der Erkenntniß gelangt, daß die Arbeit, welche zur Bewegung einer Masse verwendet wird, sich in Form von lebendiger Kraft in dieser Masse ansammelt, sowie daß diese lebendige Kraft eine gleiche Arbeit leisten kann, daß also demnach jene Arbeit in einen gleichen Betrag lebendiger Kraft verwandelt worden, daß nicht der geringste Betrag derselben verschwunden, sondern daß sie vielmehr in Form von lebendiger Kraft ungeschwächt erhalten geblieben ist. Bei dieser Gelegenheit wurde schon die Frage angeregt, ob die Arbeit, welche einen Widerstand auf bestimmtem Wege überwinde, ein entgegengesetztes Verhalten zeige, ob sie hierbei wirklich consumirt, vernichtet werde, wie man z. B. vermuthen kann, wenn durch Arbeit unserer Muskelkraft Holz gesägt wird, da wir nach Vollbringen solcher Arbeit keine vorhandene lebendige Kraft wahrnehmen können. Mit dieser Frage hängt noch eine zweite Frage zusammen. Es wurde öfter erwähnt, daß der ruhende todte Druck keine Arbeit leiste, sondern erst arbeitsfähig werde, wenn mit ihm Bewegung verbunden sei; es stellt sich hier die Frage, ob denn aller ruhende Druck in gleicher Weise arbeitsunfähig sei, ob nicht vielmehr arbeitsunfähiger und arbeitsfähiger Druck unterschieden werden müsse. Hiermit hängt wieder eng die dritte Frage zusammen, ob wirklich alle arbeitsfähige Kraft lebendige Kraft, Massenbewegung sei. Unter *Kraft* wird in diesen Abschnitten nicht der todte Druck oder Zug, sondern Druck oder Zug in Bewegung, Massenbewegung, Arbeit verstanden; doch wollen wir, wo Irrthum entstehen könnte, arbeitsfähige Kraft statt Kraft in diesem Sinne sagen und statt des Wortes Kraft im gewöhnlichen Sinne die Ausdrücke Druck oder Zug gebrauchen. Alle diese Fragen sind durch folgende Sätze zu beantworten:

Wenn ein Körper Arbeit consumirt, indem an ihm ein Widerstand überwunden wird, so erfährt der Körper entweder als Ganzes oder in seinen Molekülen eine Lagenveränderung. In oder vermöge dieser Lagenveränderung enthält der Körper einen Druck, ein Bestreben, in die frühere Lage zurückzukehren; wird das Hinderniß, das diesem Drucke entgegensteht, beseitigt, wozu keine Arbeit nöthig ist, so kehrt der Körper mit jenem Drucke in die frühere Lage zurück und producirt hierbei dieselbe Arbeit, die er bei der ersten Lagenveränderung consumirte. Der veränderte Körper enthält daher die Fähigkeit, die consumirte Arbeit wieder zu produciren, er enthält arbeitsfähige Kraft in Form von comsumirter Arbeit. Man nennt diese Fähigkeit, consumirte Arbeit wieder zu produciren, **Spannkraft** und mißt dieselbe durch die consumirte Arbeit. Lebendige Kraft und Spannkraft sind demnach arbeitsfähige Kräfte. Die lebendige Kraft ist Arbeit in Form von Massenbewegung, die Spannkraft ist Arbeit in einer Form, die uns noch nicht bekannt ist; wir sagen deßhalb, sie ist consumirte Arbeit. **Die lebendige Kraft eines Körpers ist die Arbeit, welche er vermöge seiner Geschwindigkeit, und die Spannkraft ist die Arbeit, welche er vermöge seiner Lage zu leisten befähigt ist.** Die beiden arbeitsfähigen Kräfte stimmen darin überein, daß sie Arbeit leisten; man bezeichnet sie daher auch mit einem Namen, mit dem Worte **Energie**, und zwar die lebendige Kraft, da sie aus bewegter Masse besteht, mit dem Namen **Energie der Bewegung**, und die Spannkraft, da wir an ihren Trägern keine Bewegung, sondern nur eine Lagenveränderung wahrnehmen, mit dem Namen **Energie der Lage**. Diese allgemeinen Sätze müssen wir an möglichst vielen Beispielen zur Klarheit bringen.

Das einfachste und am vollständigsten durchführbare Beispiel ist das Heben eines Körpers. Wird ein Körper vom Gewichte p zur Höhe h gehoben, so ist dafür die Arbeit ph nöthig, der Körper hat die Arbeit ph consumirt. Legen wir denselben nun in der Höhe h auf ein Brett, so übt er auf dasselbe einen Druck aus gleich seinem Gewichte; denselben Druck übt er allerdings auch auf den Erdboden aus, wenn er auf demselben liegt; aber wirthschaftlich unterscheidet sich der erstere Druck von dem letzteren; vermöge des letzteren kann niemals etwas geleistet werden, er ist ein todter Druck; vermöge des ersteren kann dagegen Arbeit vollbracht werden; denn nehmen wir die Unterstützung weg, wofür keine Arbeit nöthig ist, so fällt der Körper, es sammelt sich in ihm die Arbeit seines Gewichtes zu immer wachsender lebendiger Kraft. Die lebendige Kraft, die er bei seiner

Ankunft auf dem Boden enthält, $L = \frac{1}{2} mv^2$, ist nun genau gleich der Arbeit ph, die zu seinem Heben nöthig war; denn $\frac{1}{2} mv^2$ läßt sich auch in der Gestalt $mg \cdot (v^2 : 2g)$ schreiben; mg ist aber das Gewicht p des Körpers und $v^2 : 2g$ ist die Höhe, welche er herabgefallen ist; also ist $\frac{1}{2} mv^2 = ph$; die lebendige Kraft, die der gehobene Körper entwickeln kann, ist gleich der consumirten Arbeit. Der gehobene Körper unterscheidet sich also von dem auf dem Boden liegenden dadurch, daß er die consumirte Arbeit produciren kann, er enthält die Fähigkeit, die consumirte Arbeit zu produciren, er enthält Spannkraft oder Energie der Lage $= ph$, während der am Boden liegende Körper wohl einen Druck enthält, aber keine Energie. Der Druck des gehobenen Körpers ist ein arbeitsfähiger Druck, der des zu Boden liegenden Körpers ist ein todter Druck. Warum der erstere Körper arbeitsfähig ist, wie er die consumirte Arbeit enthält, ist uns unbekannt; es ist durchaus nicht ausreichend zur Erklärung, wenn man, wie Mayer, angibt, er enthält die Arbeit, weil er sie consumirt hat; gewöhnlich schreibt man die Ursache der Anziehung zwischen dem Körper und der Erde zu; allein einerseits ist die Anziehung auf den gehobenen Körper dieselbe wie auf den Körper am Boden, erklärt also diesen Unterschied nicht, und andererseits ist die Anziehung selbst nicht erklärt; aller Wahrscheinlichkeit nach beruht die Wirkung auf einem außerhalb der Erde wirksamen Agens, welchem durch das Heben eine erhöhte lebendige Kraft mitgetheilt wurde, und das vermöge derselben den gehobenen Körper zurück treibt, ihm die lebendige Kraft mittheilt; hiermit wären wir auch an der Möglichkeit angelangt, auch die Spannkraft, den arbeitsfähigen Druck des gehobenen Körpers als lebendige Kraft zu erklären. Wie sich dies auch verhalten möge, — und der eigentliche Sachverhalt ist hier unwesentlich, — soviel steht fest, daß der gehobene Körper eine Energie der Lage, eine Spannkraft gleich der consumirten Arbeit enthält, die ihn befähigt, eine gleiche lebendige Kraft zu entwickeln. Um zu zeigen, wie zahlreiche Verwendungen diese Spannkraft hat, braucht nur an das Wasser erinnert zu werden, das in Form von Dampf in die Luft aufsteigt, als Regen und Schnee wieder herabfällt, mittels der Wasserräder zahlreiche Arbeiten verrichtet, Schiffe trägt und die Gebirge allmälig zerstört, um sie als neue Erdschichten im Meere abzusetzen. Ein hoch gelegener See ist ein Reservoir mit Spannkraft erfüllt; denn er kann durch Oeffnen der Schleußen Mühlen treiben und die Maschinen von Fabriken aller Art in Arbeit versetzen.

Dieselbe Erscheinung, das Auftreten einer Spannkraft oder Energie der Lage, die wir bei der Veränderung der Lage eines Körpers beobachten, nehmen wir auch bei der Veränderung der Lage seiner Moleküle wahr. Wenn die Sehne eines Bogens gespannt wird, so hat sie die Fähigkeit, den Pfeil fortzuschleudern; die Arbeit des Spannens hat sich in Spannkraft der Sehne verwandelt. Wenn wir die Feder einer Uhr durch Arbeit unserer Muskeln mehr zusammenwinden, so verwandelt sich unsere Arbeit in die Spannkraft der Feder, die dann den Gang der Uhr bewirkt; hier entspricht der Ausdruck Spannkraft auch dem gewöhnlichen Sprachgebrauche. Ueberhaupt, wenn wir irgend einen Körper zusammendrücken, ausdehnen oder verwinden, so erfahren die Moleküle eine Verschiebung; sie haben dann das Bestreben, in die frühere Lage zurück zu kehren und die Gestalt des Körpers wieder herzustellen; unsere Arbeit hat sich in eine Spannkraft verwandelt, für deren Druck seit langer Zeit der Name Elasticität oder Federkraft gebräuchlich ist. Die Erklärung dieser Thatsachen läßt noch Manches zu wünschen übrig. Wenn durch die consumirte Arbeit die Moleküle von einander entfernt werden, so nimmt man auch hier, wie bei dem gehobenen Körper, die unerklärte Anziehung zu Hilfe, und erklärt durch dieselbe ihre Rückkehr. Mehr Befriedigung gewährt die Erklärung für den Fall, daß die Moleküle einander genähert wurden. Moleküle können sich nur dann einander nähern, wenn ein Druck auf sie ausgeübt wird, der in stoßender Weise wirkt; hierdurch wird den Molekülen Arbeit mitgetheilt, ihre Bewegung wird vermehrt, sie stoßen dann mit größerer Geschwindigkeit gegen die folgenden Moleküle, kehren mit größerer Geschwindigkeit um und können dann in die alte Lage zurückkommen. Eine weiter hier auftretende Frage ist die, was aus der durch die Spannkraft erzeugten lebendigen Kraft wird, mit welcher die Moleküle in ihrer früheren Lage ankommen. In dem vorigen Beispiele, betreffend den fallenden Körper, kann mit der lebendigen Kraft des fallenden Körpers die mannigfachste Arbeit vorgenommen werden; in den eben betrachteten Beispielen befördert die lebendige Kraft der Sehne den Pfeil, die der aufrollenden Feder treibt die Uhr. Wenn aber die Theilchen eines elastischen Körpers zurückkehren, ohne ihre lebendige Kraft für irgend eine Arbeit abzugeben, so gehen sie nach dem Gesetze der Trägheit über ihre ursprüngliche Lage hinaus, werden dann von entgegen stehenden Theilchen zurückgeworfen oder von anderen hinter ihnen liegenden Theilchen zurückgezogen; sie kommen dann abermals in ihre ursprüngliche Lage zurück, wo sie wieder dasselbe Schicksal haben; sie gerathen also hierdurch in Schwingungen; die Schwingungen der Körpermoleküle aber bilden die Wärme. Die aus der Spannkraft hervorgehende lebendige Kraft ist also in diesen Fällen Wärme.

Es gibt indeß auch Körper, welche Spannkraft enthalten, ohne daß sie Arbeit consumirt zu haben scheinen, wie z. B. ein auf einem Brette über einer Schachtmündung liegender Stein, der nach Wegnahme des Brettes durch Hinabstürzen lebendige Kraft entwickelt, also Spannkraft enthält, oder eine Bergschicht, welche nach dem allmäligen Unterwaschen tieferer Schichten sich in Bewegung versetzt und Bergstürze verursacht (Goldau, Caub), oder eine Erdschicht, welche nach dem Auflockern tieferer Schichten durch Sickerwasser einstürzt und nach der neueren neptunischen Geologie Erdbeben und Vulkane erzeugt u. s. w. In solchen Fällen ist der Körper an die Stelle solcher Körper getreten, die Arbeit consumirt haben, wie z. B. der auf dem Schachtbrett ruhende Stein an die Stelle der Körper, die um den Schacht zu bilden, aus der Tiefe gehoben werden mußten. Oder der Körper ist schon in der Vergangenheit gehoben worden, wie die Bergschichten über die Erdoberfläche u. s. w.

Damit eine Spannkraft wirksam werde, muß in den meisten Fällen ein Hinderniß beseitigt werden, wie bei den genannten Steinen das Brett, es muß, wie man sagt, eine **Auslösung der Spannkraft** stattfinden.

Ein besonders interessantes Beispiel von Spannkraft bieten uns die Pflanzen. Die Luft wird bekanntlich durch die zahlreichen Verbrennungen des gewöhnlichen Lebens, durch die Fäulniß organischer Stoffe und die Athmung fortwährend von Kohlensäure (Kohlendioxyd CO_2) durchdrungen, deren starke Anhäufung die Luft bald für das Leben gefährlich machen würde. Die Pflanzen beseitigen diese Gefahr und ernähren sich, indem an ihrer Oberfläche durch die lebendige Kraft oder Arbeit der Sonnenstrahlen der Kohlenstoff von dem Sauerstoff des Kohlendioxyds getrennt und in die Pflanzen aufgenommen wird, während der Sauerstoff in die Atmosphäre zurückkehrt. Durch die Arbeit der Sonnenstrahlen wird also die Anziehung der beiden Elemente überwunden, der Kohlenstoff in den Pflanzen und der Sauerstoff in der Luft angehäuft. Kohlenstoff und Sauerstoff haben folglich eine Arbeit consumirt und enthalten daher eine Spannkraft, die wir in diesem und zahlreichen ähnlichen Fällen chemische Verwandtschaft nennen; vermöge dieser Spannkraft können sich diese Elemente wieder verbinden, der Kohlenstoff kann verbrennen und hierdurch Wärme d. i. lebendige Kraft erzeugen. Also auch hier ist in Folge consumirter Arbeit eine Fähigkeit vorhanden, lebendige Kraft zu entwickeln, eine Fähigkeit, Spannkraft oder Energie der Lage genannt.

Wenn wir einen Glasstab mit einem Kautschuklappen reiben, so wird der Glasstab positiv und der Lappen negativ elektrisch; die beiden Elektricitäten ziehen einander an, haben das Bestreben, sich zu vereinigen, was man beobachten kann, wenn man den Glasstab an einen Seidenfaden hängt und den Kautschuklappen in seine Nähe bringt: der Glasstab bewegt sich dann zu dem Lappen hin. Hier ist also die Arbeit der Reibung in eine Spannkraft übergegangen, die wir elektrische Anziehung nennen, und welche im Stande ist, lebendige Kraft zu erzeugen: dies geht schon aus der Annäherung des Glasstabes hervor; kommen die beiden Körper einander noch näher, so springt ein Funken über; es entsteht also dann Wärme, eine lebendige Kraft. In dieser Weise bringt jede consumirte Arbeit die Fähigkeit hervor, lebendige Kraft von gleichem Betrage zu erzeugen, sie entwickelt eine Spannkraft, eine Energie der Lage von gleicher Größe. Hierdurch wird die Nothwendigkeit nahe gelegt, den Zusammenhang zwischen Arbeit und lebendiger Kraft noch in weiteren Consequenzen zu untersuchen, insbesondere, da wir bisher immer von nur einem Körper gesprochen haben, in Bezug auf eine Verbindung von Körpern, ein Massensystem.

34 **Die Erhaltung der lebendigen Kraft** (Johann Bernoulli 1727). Wenn ein in Bewegung befindliches Massensystem, das also schon eine gewisse lebendige Kraft in sich trägt, keine Einwirkung erfährt, so bleibt seine lebendige Kraft ungeändert, weil seine Masse unverändert bleibt, und weil die Geschwindigkeit sich nur durch eine Einwirkung ändern könnte. Wenn es aber eine Einwirkung erfährt, und demnach Arbeit consumirt, ohne jedoch seine Lage gegen die Erde oder die Lage der Massen gegen einander zu ändern, so entsteht keine Spannkraft, sondern die ganze consumirte Arbeit wird in lebendige Kraft umgewandelt; es wird folglich die lebendige Kraft des Systems vermehrt, und zwar um den Betrag $\frac{1}{2}mv^2$, der nach dem ersten Satze der Arbeit ks gleich ist. Wenn alsdann das Massensystem auf andere Körper einwirkt und an diesen durch seine lebendige Kraft eine gewisse Arbeit k_1s_1 producirt, so verliert es nach dem zweiten Satze einen der Arbeit k_1s_1 gleichen Betrag $\frac{1}{2}mv_1^2$ von lebendiger Kraft. Wir haben folglich die 2 Gleichungen $ks = \frac{1}{2}mv^2$ und $k_1s_1 = \frac{1}{2}mv_1^2$. Subtraction derselben

ergibt $ks - k_1 s_1 = \frac{1}{2}(mv^2 - mv_1^2)$ d. h. der Zuwachs eines Massensystems an lebendiger Kraft ist gleich der Differenz zwischen der verzehrten und der geleisteten Arbeit. Ist die verzehrte Arbeit so groß wie die geleistete, also die Differenz der beiden $= 0$, so ist auch $\frac{1}{2}(mv^2 - mv_1^2) = 0$, also der Zuwachs an lebendiger Kraft $= 0$. Indessen kann jetzt die Vertheilung der lebendigen Kraft eine andere sein als vor dem Stattfinden der beiden Arbeiten. Denn bei dem Consumiren der ersten Arbeit kann die entstandene lebendige Kraft auf andere Massentheile gekommen sein, als diejenigen sind, welche zum Produciren der zweiten Arbeit ihre lebendige Kraft ganz oder theilweise verloren haben; es kann z. B. bei dem Consumiren Arbeit der Moleküle entstanden sein, während bei dem Produciren Arbeit der Atome verloren wurde. Hieraus folgt der Satz: **Wenn ein bewegtes Massensystem solche Veränderungen erfahren hat, durch welche weder ein Ueberschuß gewonnener noch ein Ueberschuß verzehrter Arbeit entsteht, so ist die Summe der lebendigen Kräfte des ganzen Systems dieselbe geblieben, oder sie ist eine constante Größe.** Man nennt diese Wahrheit den Satz von der Erhaltung der lebendigen Kraft.

Wenn die beiden Arbeiten von inneren Kräften herrühren, und wenn bei der Einwirkung dieser Kräfte alle Körpertheilchen wieder in ihre ursprüngliche Lage gegen einander oder gegen ein festes Centrum gelangt sind, so sind die beiden Arbeiten offenbar einander gleich; folglich gilt auch dann die Beständigkeit der lebendigen Kräfte; daher spricht Helmholtz (1847) den Satz folgendermaßen aus: Wenn sich eine beliebige Anzahl von beweglichen Massenpunkten nur unter dem Einflusse solcher Kräfte bewegt, welche sie selbst gegen einander ausüben, oder welche gegen feste Centren gerichtet sind: so ist die Summe der lebendigen Kräfte aller zusammen genommen zu allen Zeitpunkten dieselbe, in welchen alle Punkte dieselben relativen Lagen gegen einander und gegen die etwa vorhandenen festen Centren einnehmen, wie auch ihre Bahnen und Geschwindigkeiten in der Zwischenzeit gewesen sein mögen.

35 **6. Zusammenhang der arbeitsfähigen Kräfte: Das Princip von der Erhaltung der Kraft** (Mayer 1842, Helmholtz 1847).

Nach dem Satze von der Erhaltung der lebendigen Kräfte ist die Summe der lebendigen Kräfte eines Massensystems constant, unter der Voraussetzung, daß von dem Systeme schließlich weder Arbeit producirt, noch consumirt wird. Wenn ein beschränktes System Arbeit von außen aufnimmt oder äußere Arbeit leistet, so gilt offenbar der Satz nicht mehr, weil durch Aufnahme von Arbeit die lebendige Kraft um einen gleichen Betrag zunimmt und durch Leistung von Arbeit die lebendige Kraft um den Betrag der Arbeit abnimmt. Wenn daher der Satz seine Giltigkeit behalten soll, so muß die Aufnahme und die Leistung von äußerer Arbeit ganz ausgeschlossen bleiben; dies ist unter allen Umständen nur möglich bei dem System aller überhaupt vorhandenen Massen, in dem ganzen Massensystem des Weltalls, weil dieses, da außer demselben keine Massen mehr vorhanden sind, weder Arbeit an äußere Massen abgeben, noch Arbeit von äußeren Massen empfangen kann. Innerhalb dieses Massensystems aber werden durch die vorhandenen lebendigen Kräfte Arbeiten geleistet und werden auch Arbeiten consumirt. Untersuchen wir nun, welche Veränderung an dem Satze von der Erhaltung der lebendigen Kraft vorgenommen werden muß, wenn innerhalb des Systems aller Massen durch lebendige Kraft desselben Arbeit geleistet, oder wenn Arbeit aufgenommen wird.

Zuerst wenn von einem gewissen Theile der gesammten lebendigen Kraft Arbeit geleistet wird, so ist diese Arbeit nach dem zweiten Satze über die lebendige Kraft gleich jenem Theile von lebendiger Kraft. Diese Arbeit aber kann einen verschiedenen Erfolg haben; sie kann zunächst wieder lebendige Kraft hervorrufen; da diese nach dem ersten Satze gleich der Arbeit ist, so ist sie auch gleich jenem Theile der lebendigen Kraft des Systems, der die Arbeit geleistet hat; folglich

ist in diesem Falle die constante Summe der lebendigen Kraft wieder hergestellt. Wenn jedoch die Arbeit nicht sofort wieder lebendige Kraft erzeugt, so ist sie in der Form einer Spannkraft an einen Theil der Masse gebunden, wodurch dieser Theil die Fähigkeit hat, einen gleich großen Betrag von lebendiger Kraft wieder hervorzubringen; jener Theil der lebendigen Kraft, der die Arbeit geleistet hat, ist daher in eine Spannkraft von gleichem Werthe umgewandelt worden. Wenn demnach aus der Summe der lebendigen Kräfte eines Systems ein gewisser Betrag ausgetreten ist, so tritt eine gleichwerthige Spannkraft an dessen Stelle. So nimmt der Satz die Form an: Die Summe der lebendigen Kräfte und der aus solchen hervorgegangenen Spannkräfte ist constant.

Wenn nun die Spannkräfte, die unter unseren Augen aus lebendigen Kräften hervorgehen, einer gewissen Summe von lebendiger Kraft gleichgeltend sind und daher in den Gesammtbetrag aller lebendigen Kräfte gehören, so muß dies folgerichtig auch für diejenigen Spannkräfte gelten, die schon früher aus solchen entstanden sind, oder in unmerklicher Weise fortwährend aus solchen hervorgehen, ja auch für diejenigen Spannkräfte, deren Entstehung uns noch ganz und gar unbekannt ist. Denn alle diese können lebendige Kräfte von bestimmtem Betrage erzeugen, sind also alle zusammen einer bestimmten Summe von lebendigen Kräften gleichgeltend. Wenn wir demnach alle Spannkräfte in die constante Summe aufnehmen, so erleidet unser Satz auch keine Beschränkung mehr durch die zweite Voraussetzung, daß nämlich das Massensystem Arbeit aufnehme. Denn würde das Massensystem eine Arbeit erleiden, so könnte dieselbe nur von einer lebendigen Kraft oder einer Spannkraft geleistet werden; es müßte demnach, um dem System aller Massen eine Arbeit an irgend einer Stelle zuzuführen, an einer anderen Stelle eine gleich große lebendige Kraft oder Spannkraft aus der Gesammtsumme austreten, so daß jener Gewinn durch diesen Verlust compensirt würde. Es gilt demnach allgemein der Satz:

Die Summe der lebendigen Kräfte und der Spannkräfte ist constant.

Man nennt diesen Satz das Princip von der Erhaltung der Kraft. In dieser Form wurde er zuerst von Helmholtz 1847 ausgesprochen und mathematisch bewiesen. Wie bereits erwähnt, nennt man die lebendige Kraft auch Energie der Bewegung und die Spannkraft Energie der Lage; diese Benennung hat den Vortheil, daß man die Summe der lebendigen Kräfte und der Spannkräfte eines Körpers mit dem einfachen Ausdrucke Energie des Körpers bezeichnen kann. Wendet man diese Bezeichnung an, so nimmt das Grundgesetz der Naturwissenschaft die von Clausius 1865 zuerst ausgesprochene Gestalt an:

Die Energie des Weltalls ist constant.

Einen Nachweis für dieses Gesetz bieten uns die Erscheinungen des freien Falles. Wenn wir einen Körper von 20^{kg} mit einer Geschw. von 50^m senkrecht aufwärts schießen, so ist seine leb. Krft. $^1/_2 mv^2 = 2500^{mk}$. Vermöge derselben leistet er die Arbeit, sein eigenes Gewicht von 20^{kg} auf die Höhe $v^2 : 2g = 125^m$ hoch zu heben, consumirt also die Arbeit $20 . 125 = 2500^{mk}$, wodurch er in dieser Höhe zur Ruhe gelangend die Spannkraft 2500^{mk} enthält; dies wird, wie bekannt, dadurch nachgewiesen, daß er im Stande ist, vermöge dieser Spannkraft die Höhe von 125^m wieder herabzufallen, hierdurch am Fuße dieser Bahn die Geschw. $\sqrt{(2gs)} = 50^m$ anzunehmen und so die lebendige Kraft von $^1/_2 : (20 : 10)\, 50^2 = 2500^{mk}$ wieder zu erzeugen; oder, was dasselbe ist, auch dadurch, daß er im Stande ist, sein eigenes Gewicht von 20^{kg} durch einen Weg von 125^m herabzutreiben und somit eine Arbeit von $20 . 125 = 2500^{mk}$ zu produciren. Im Beginn des Niederfallens enthält also der Körper die Spannkraft 2500^{mk}. — Untersuchen wir, wie es nach 1 Sec. des Niederfallens mit ihm steht. Nach 1 Sec. hat er eine Geschw. von 10^m und demnach eine leb. Kft. von 100^{mk}. — Der Weg, welchen er bis dahin zurückgelegt hat, ist $^1/_2 gt^2 = 5^m$; folglich kann er sein Gewicht von 20^{kg} noch 120^m herabtreiben, enthält

also noch eine Spannkraft von 20 . 120 = 2400^{mk}; fügen wir hierzu seine leb. Kft. von 100^{mk}, so erfahren wir, daß die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft = 2500^{mk} nach 1 Sec. des Fallens ebenso groß ist, als die Spannkraft am Anfange des Fallens. Fassen wir nun seinen Zustand nach 2 Sec. des Fallens ins Auge. Der Körper hat dann die Geschw. $c = gt = 20^m$, also die leb. Kft. 400^{mk}. Der zurückgelegte Weg beträgt in diesem Zeitpunkte $s = \frac{1}{2} gt^2 = 20^m$; folglich vermag seine Spannkraft ihn noch 105^m abwärts zu treiben, beträgt daher 20 . 105 = 2100^{mk}. Wieder ist die Summe der leb. Kft. 400^{mk} und der Spannkraft 2100^{mk} ebenso groß, wie am Beginne und nach 1 Sec. des Fallens, nämlich 2500^{mk}. Dasselbe Resultat erhalten wir für den Zeitpunkt nach 3 Sec. des Fallens; denn alsdann hat der Körper eine Geschw. $c = gt = 30^m$, also eine leb. Kft. von 900^{mk}, der zurückgelegte Weg beträgt in diesem Moment $s = \frac{1}{2} gt^2 = 45^m$; es bleibt ihm demnach noch ein Fallraum von 80^m, durch welchen ihn seine Spannkraft treibt, die folglich = 20 . 80 = 1600^{mk} groß ist; auch hier ist die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft = 900 + 1600 = 2500^{mk}. Und wenn wir den Körper noch für den Endpunkt der 4ten Sec. verfolgen, finden wir in ihm dieselbe Energie. Nach 4 Sec. ist nämlich seine Geschw. $c = gt = 40^m$ und seine leb. Kft. = 1600^{mk}; seine Entfernung vom Ausgangspunkte erreicht jetzt $s = \frac{1}{2} gt^2 = 80^m$, so daß er noch 45^m durchfallen, also noch eine Arbeit von 45 . 20 = 900^{mk} leisten kann; fügen wir zu dieser Spannkraft von 900 die leb. Kft. von 1600^{mk}, so finden wir auch hier für seine Gesammtenergie den Betrag von 2500^{mk}. Wenn endlich der Körper 5 Sec. gefallen ist, so ist seine Geschw. $c = gt = 50^m$ und seine leb. Kft. = 2500^{mk}; Spannkraft enthält er im Ganzen nicht mehr; denn sein Weg $s = \frac{1}{2} gt^2$ ist jetzt 125^m; er ist also auf dem Boden angelangt, kann keinen weiteren Weg zurücklegen, also keine Arbeit mehr leisten; die Summe von Spannkraft und leb. Kft. ist auch jetzt 2500^{mk}. So findet man, daß die Summe der leb. Kft. und der Spannkraft des Körpers in jedem Zeitpunkt dieselbe bleibt, womit unser Gesetz nachgewiesen ist; allerdings nur für einen Körper, und zwar für den Fall, daß derselbe äußere Arbeit weder producirt noch consumirt; da indessen dieser Fall auch für das Weltall gilt, so kann man den Nachweis auch auf dieses System aller Massen ausdehnen.

In dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft darf man unter Kraft nicht einen todten Druck oder Zug, ja nicht einmal den arbeitsfähigen Druck oder Zug, der in jeder Spannkraft oder lebendigen Kraft enthalten ist, verstehen, sondern das, was eigentlich allein wahrhaft den Namen einer Kraft verdient, das Product von Druck oder Zug mit dem Wirkungsraume, die Arbeit selbst, die lebendige Kraft und die Spannkraft in Meterkilogrammen, in Arbeitsmaß, ausgedrückt. Um Verwechselungen in der Benennung Kraft zu vermeiden, wäre es deßwegen wohl geeignet, die Bezeichnung Energie für lebendige Kraft und Spannkraft zu verwenden und den Ausdruck Kraft blos für Druck oder Zug vorzubehalten; man müßte dann aber die Wärme, den elektrischen Strom u. s. w. Energieen nennen. Alsdann würde jedoch der Ausdruck Kraft für Alles, was wahrhaft diesen Namen verdient, ganz verschwinden; und da außerdem für die Naturkräfte Wärme u. s. w. im Deutschen der Name Kraft vollkommen eingebürgert ist, so ist die Bezeichnung Kraft für Arbeit doch nicht mehr auszumerzen; bei einiger Aufmerksamkeit sind Verwechselungen leicht zu vermeiden.

36 **7. Verwandlung der Naturkräfte.** Das Princip von der Erhaltung der Kraft, der Fundamentalsatz der neueren Naturbetrachtung, hat eine mannigfaltige Bedeutung. In diesem Satze liegt zunächst ausgesprochen, daß alle lebendigen und alle Spannkräfte immer denselben Arbeitsbetrag ausmachen, daß also Arbeit oder arbeitsfähige Kraft weder vernichtet, noch aus nichts erzeugt werden kann; hiernach ist der Kraftvorrath der Natur ebenso unveränderlich, wie die Stoffmenge derselben; „das Naturganze enthält einen unerschöpflichen, unveränderlichen Kraftvorrath“. Neben diesem Gedanken der Erhaltung der Kraft enthält das Princip jedoch auch den Gedanken der Einheit der Kraft; alle Kraft ist nach demselben Arbeit, Massenbewegung, Energie, und alle Erscheinungen sind nach demselben nur Umwandlungen zwischen den verschiedenen Formen der Energie, Umwandlungen einer Art lebendiger Kraft in eine andere Art lebendiger Kraft, oder Umwandlungen von lebendiger Kraft in Spannkraft, oder Umwandlungen von Spannkraft in lebendige Kraft, oder endlich Umwandlungen einer Art von Spannkraft in eine andere Art von Spannkraft; und diese Umwandlungen geschehen immer in der Weise, daß der Arbeitsbetrag, die Zahl der Meterkilogramme, durch welche die lebendige Kraft oder Spannkraft gemessen wird, nach der Verwandlung

ebenso groß ist wie vor der Verwandlung. So mannigfaltig indessen die Arten der lebendigen Kraft und der Spannkraft oder der Energie auch sind, so lassen sie sich doch, was die Uebersicht erleichtert, in gewisse Abtheilungen bringen. Die Energie der Bewegung großer Massen, wie die Energie fallender Körper, der Weltkörper, der Eisenbahnzüge, des bewegten Wassers, der Winde u. s. w. fällt leicht ins Auge, wird daher sichtbare Energie der Bewegung genannt; die lebendige Kraft der kleinsten Theilchen dagegen entgeht als solche unserem Gesichtssinne; man nennt daher Wärme, Licht, Schall, den elektrischen Strom, den Magnetismus, die alle aus Bewegungen der Moleküle bestehen, unsichtbare Energie der Bewegung, unsichtbare lebendige Kraft. Ebenso gebraucht man den Ausdruck sichtbare Spannkraft, sichtbare Energie der Lage für gehobene oder aus ihrer Lage gebrachte größere Massen; so enthält der Schnee der Gebirge, das Wasser der Höhen, wie auch das fließende Wasser sichtbare Energie der Lage, ebenso wie jeder gespannte elastische Körper, jede zusammengedrückte Luftmasse diese sichtbare Spannkraft darbietet. Unsichtbare Energie der Lage ist die chemische Verwandtschaft und die Elektricität; Schießpulver, ein Steinkohlenlager, eine Gewitterwolke enthalten unsichtbare Spannkraft.

Bedauerlich ist trotz des bezeichnenden Namens der Energie, daß man in den deutschen Lehrbüchern nicht bei den älteren Bezeichnungen lebendige Kraft und Spannkraft geblieben ist, sondern von fremden Völkern, denen jene Namen fehlen, das Wort Energie mit zahlreichen verschiedenen Beiwörtern aufgenommen hat. So sagt man für lebendige Kraft nicht blos Energie der Bewegung, sondern auch wirkliche Energie und kinetische Energie und dynamische Energie, auch wirkliche Arbeit, und für Spannkraft nicht blos Energie der Lage, sondern auch mögliche Energie, potentielle Energie, virtuelle Energie, ruhende Energie, sowie auch Arbeitsvorrath, Arbeitsvermögen, ruhende Arbeit u. s. w.

Es macht keine Schwierigkeit, aus dem Princip zu folgern, daß Kraft unmöglich vernichtet und ebenso unmöglich aus nichts erzeugt werden kann; es würde ja sonst der constante Gesammtbetrag fortwährend verändert werden, also nicht constant bleiben. Schwieriger ist es, diese Folgerung auch überall bewährt zu finden, da uns häufig genug Beispiele aufstoßen, wie beim Durchsägen von Holz oder beim Aufschlagen eines Körpers auf den Boden, wo die Arbeit oder die lebendige Kraft ganz verloren zu sein scheint. Hiermit stehen in engstem Zusammenhange die Verwandlungen der Energie, die Gestalten, welche dieselbe in den verschiedensten Fällen annimmt, und welche oftmals nur mit Schwierigkeiten zu verfolgen sind. Diese Schwierigkeiten sind nicht im Allgemeinen, sondern am besten an einzelnen Beispielen zu überwinden. Wir wollen daher eine Anzahl von Verwandlungen durchführen.

Der senkrecht in die Höhe geworfene Körper verwandelt seine sichtbare lebendige Kraft, die er im Beginne des Steigens besitzt, bis zum Aufhören des Steigens in eine gleiche sichtbare Spannkraft, und diese dann beim Fallen wieder in die gleiche sichtbare lebendige Kraft. Mit dieser lebendigen Kraft schlägt der Körper auf den Boden auf, überwindet dessen und seine Festigkeit, drückt die getroffenen Bodentheilchen in den Boden und seine treffenden Theilchen in sich selbst zurück. Durch diese Lagenänderung der Moleküle wird die lebendige Kraft des Körpers in Spannkraft verwandelt. Wäre der Körper absolut elastisch und die getroffene Bodenstelle ebenfalls absolut elastisch, so würden die Moleküle dieser Körper genau in die frühere Lage zurückkehren, wodurch sie ihre gesammte Spannkraft entwickeln würden und hierdurch dem gefallenen Körper dieselbe lebendige Kraft zurückgeben müßten, durch welche er dann wieder zur früheren Höhe steigen könnte; bei dem folgenden Fallen würde sich dieselbe Erscheinung wiederholen, und es würde dann ein ewiges Steigen und Fallen die Folge sein, das Perpetuum mobile, der ewige Umgang wäre erreicht. Leider gibt es aber keinen absolut elastischen Körper; die eingedrückten Theilchen kehren niemals vollkommen in ihre frühere Lage zurück, sie behalten einen Theil der Spannkraft und verwandeln denselben in unsichtbare lebendige Kraft, indem sie nach der Rückkehr von den jetzt näher liegenden Nachbartheilchen stärker angezogen werden, dann wieder rascher zurückkehren und so ihre Schwingungen vermehren, ihre Wärme erhöhen. Es wird also bei jedem Auffallen des Körpers ein Theil der sichtbaren lebendigen Kraft in unsichtbare, in Wärme verwandelt und hierdurch allmälig die gesammte sichtbare Energie des Körpers verzehrt. Ganz ähnlich sind die Verhältnisse in den Maschinen; es wäre wohl eine Maschine denkbar, welche ununterbrochen lebendige Kraft in Spannkraft und diese wieder in lebendige Kraft umwandeln könnte; und da die Arbeitsbeträge dieser Kräfte immer einander

gleich sind, so könnte eine Maschine zu einem Perpetuum mobile werden, wenn es eben keine Hindernisse der Bewegung, keine Reibung gäbe. Diese Erscheinung tritt aber bei jeder Bewegung auf; die hervorragenden Theilchen eines bewegten Körpers fassen die hervorragenden Theilchen der denselben berührenden Körper, reißen sie ein wenig mit fort, lassen sie dann los und versetzen dieselben so in Schwingungen, durch welche ein Theil der sichtbaren lebendigen Kraft des bewegten Körpers in unsichtbare der Moleküle verwandelt wird; so wird allmälig die vorhandene lebendige Kraft aufgezehrt; das Perpetuum mobile ist unmöglich, weil die Reibung allmälig jede lebendige Kraft und jede Spannkraft sich berührender Körper in Schwingungen umwandelt. Anfänglich mögen es große und langsame Schwingungen sein, die den Schall bilden, der sich bei der Reibung verbreitet. Diese größeren und langsameren Schwingungen aller schallenden und tönenden Körper mögen sich wohl in die Erde fortpflanzen und dort mancherlei Arbeiten vollbringen, z. B. die geschichteten Steine in krystallinische umwandeln; jedoch müssen die weit ausgreifenden Theilchen auch auf einander schlagen, versetzen sich hierdurch in kleinere und schnellere Schwingungen, gehen also theilweise in Wärme über. Schließlich wird auf diese Weise die meiste Arbeit in Wärme umgewandelt, die in den kalten Weltraum hinausstrahlt und dort zerstreut wird; durch Nichtbeachtung dieses Vorganges entsteht der Schein, als ob Arbeit vernichtet werden könnte.

Die Erzeugung von Wärme durch Reibung, welche unsere Streichhölzchen entzündet und die Wagenachsen bis zum Glühen erhitzt, die Entstehung von Wärme durch Stoß oder Schlag, vermittelst welcher ein kräftiger Schmied einen Nagel glühend hämmern kann, die Erzeugung von Wärme durch Zusammendrücken z. B. von Luft, welche im pneumatischen Feuerzeug, in dem Rammbär, in den Sternschuppen und Feuerkugeln zur Wirkung kommt, ist eine Verwandlung von sichtbarer lebendiger Kraft in unsichtbare. Die bedeutendste künstliche Wärmequelle aber, die Verbrennung, oder richtiger gesagt, die chemische Vereinigung, ist eine Verwandlung unsichtbarer Spannkraft, der chemischen Affinität, in unsichtbare lebendige Kraft, in Wärme. Wie schon erwähnt, entsteht diese Spannkraft im Kohlenstoff der Pflanzen und im Sauerstoff der Luft durch die lebendige Kraft der Sonnenstrahlen oder der Aetherschwingungen, welche an den Pflanzen das Kohlendioxyd zersetzt, den Kohlenstoff in die Pflanzen und den Sauerstoff in die Luft führt; jeder Baum, noch mehr indeß jedes Steinkohlenlager aber ist, einem Bergsee vergleichbar, ein Reservoir von unsichtbarer Spannkraft. Kommt ein Stück Kohle unter geeigneten Umständen mit Luft in Berührung, so stürzen die Sauerstoffmoleküle mit ihrer lebendigen Kraft auf das Kohlenstück los, vereinigen sich mit Kohlenstoffatomen, geben aber hierbei ihre lebendige Kraft großentheils an die Moleküle des Kohlenstückes ab, und erhitzen so dasselbe immer mehr und mehr. Geschieht dies unter dem Kessel einer Dampfmaschine, so geht die Wärme in das Wasser über, ihre lebendige Kraft verwandelt sich in die Spannkraft des Wasserdampfes, die einzige Spannkraft', die wir schon deutlich als lebendige Kraft erkannt haben. Durch die Dampfspannung wird eine Dampfmaschine und durch diese z. B. eine Anzahl von Arbeitsmaschinen einer Möbelfabrik getrieben; es entsteht also wieder lebendige Kraft. Die lebendige Kraft der Sägemaschine, der Hobel- und Bohrmaschine vollbringt Arbeit; aber hier scheinen wir an der Grenze der Verwandlungen angelangt, die Arbeit scheint verloren zu sein. Allein einerseits entsteht durch die Erschütterungen der Arbeitsmaschinen und ihre Reibung ein großer Betrag von Schwingungen, der schließlich in Wärme übergeht; andererseits wurde oben erwähnt, daß die Spannkraft des Kohlenstoffs nur unter geeigneten Umständen wirksam werden kann. Ein Steinkohlenlager, ein Baum erhitzen keinen Dampfkessel, sie müssen zerkleinert und transportirt werden, und erfordern eine um so größere Vorerhitzung zum Verbrennen, je größer die Stücke sind. Die Möbelfabrik dagegen erzeugt Hobelspähne, welche nach geringer Vorerhitzung schon ihre Wärme abgeben, sie erzeugt Säge- und Drehspäne, welche von selbst an der Luft verfaulen, d. i. langsam verbrennen und dadurch sich fast bis zur Selstentzündung erhitzen, und sie erzeugt endlich Möbel, welche doch offenbar leichter verbrennlich sind als dicke Baumstämme. Schließlich entsteht auch hier wieder Wärme oder Vorbereitung zur Verbrennung, lebendige Kraft und Spannkraft.

Wie hier die Arbeit der Dampfmaschine der Spannkraft des Kohlenstoffs, also im Grunde der lebendigen Kraft der Sonnenstrahlen zu verdanken ist, so rührt fast alle Arbeit auf der Erde von der Sonnenwärme her. Nicht blos das Gedeihen der Pflanzen- und Thierwelt ist von der Sonne abhängig, sondern auch das weite Gebiet der Technik, ja jede Bewegung im gewöhnlichen Leben bis zur menschlichen Thätigkeit hinauf, alles gewinnt seine Kraft aus der Sonne. Die Spannkraft des gehobenen Wassers in den Wolken, den Schneegebirgen, den herabstürzenden und fließenden Wassermassen ist eine Arbeit der Sonnenstrahlen; der Wind, der in den Windmühlen und Segelschiffen Arbeit verrichtet, entsteht durch verschiedene Erwärmung der Luft von Seiten der Sonne; alle Maschinen, welche durch Wärme bewegt werden, von der Gasmaschine bis zur Locomotive, beruhen auf der

Spannkraft des Kohlenstoffs, werden also im Grunde von Sonnenstrahlen umgetrieben; der elektrische Strom, der die Telegraphen und kleine Kraftmaschinen in Bewegung versetzt, entsteht durch Verbrennung des Zinkes, und dies Metall durch die Freiheit des Kohlenstoffs, also wieder durch den Sonnenschein; ebenso wird bei der Darstellung von Eisen und anderen Metallen, sowie von Phosphor aus den Knochen die Kohle verwendet, welche uns durch Sonnenarbeit geliefert wird. Ja selbst unsere eigene Thätigkeit scheint aus verwandelten Sonnenstrahlen zu bestehen; es ist bewiesen, daß der arbeitende Mensch mehr Kohlendioxyd ausscheidet als der müßige, sowie daß der thätige Muskel mehr Sauerstoff verzehrt als der unthätige; es scheint also unsere Kraft wie die Arbeit der Dampfmaschinen auf der Verbindung des Kohlenstoffs, den wir durch die Nahrungsmittel aufnehmen, mit dem Sauerstoff, den wir einathmen, zu beruhen, also auf der Freiheit des Kohlenstoffs vom Sauerstoff, welche von den Sonnenstrahlen herrührt. Man hat hiernach nicht mit Unrecht das ganze Erdenleben als eine Arbeit der Sonne bezeichnet, und den Unterschied zwischen Pflanzen und Thieren dahin festgestellt, daß die Pflanze lebendige Kraft in Spannkraft, das Thier Spannkraft in lebendige Kraft umwandelt.

Die Verwandlung von Wärme in Arbeit und von Arbeit in Wärme ist in der Wissenschaft und deren Geschichte besonders wichtig, weil der älteste Forscher auf diesem Gebiete, Mayer aus Heilbronn, der schon im Jahre 1842 das Princip von der Erhaltung und Einheit der Kraft erkannt hat, auch damals schon eine Folgerung über das Wesen der Wärme und eine Schätzung ihres Arbeitswerthes unternommen hat, aus der seitdem eine neue und fruchtbare Wissenschaft „die mechanische Wärmetheorie" hervorgegangen ist. Man schätzte nämlich die Wärme nach Wärmemaß, wie ja alles Messen ein Vergleichen mit einer Einheit derselben Art ist; man schätzt sie auch jetzt noch so, da man die lebendige Kraft der schwingenden Moleküle nicht direct messen kann; als Wärme-Einheit oder Calorie (1ᶜ) dient diejenige Wärmemenge, welche 1ᵏᵍ Wasser um 1° zu erwärmen vermag. Der Schluß Mayers über die Calorie war folgender: Wenn alle Kräfte im Wesen gleich, nämlich Massenbewegungen sind und bei der Verwandlung ihre Arbeitswerthe nicht ändern, so muß ein bestimmter Betrag der einen Kraft, nach ihrem Maße gemessen, sich immer in einen und denselben Betrag einer anderen Kraft, auch nach ihrem eigenen Maße gemessen, verwandeln, vorausgesetzt, daß bei der Verwandlung keine Arbeit nach außen geht; demnach muß eine Calorie, wenn sie Arbeit leistet, immer dieselbe Zahl von Kilogramm-Metern hervorbringen, und 1^{mk} Arbeit muß in Wärme verwandelt unter allen Umständen dieselbe Zahl von Calorien erzeugen. Diese Folgerung wurde durch zahlreiche, seitdem angestellte Versuche in allen Fällen bestätigt, und damit der entschiedenste Nachweis für die Richtigkeit des Princips geliefert. Wärme mag Arbeit auf die verschiedenste Weise bewirken, immer entsteht durch 1^{c} eine Arbeit von 424^{mk}; und Arbeit mag Wärme durch Reibung, Stoß, Druck oder wie sonst möglich erzeugen, immer entsteht durch 1^{mk} Arbeit eine Wärme von $^{1}/_{424}{}^{c}$. Die Zahl von 424^{mk}, welche man das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit nennt, und die Zahl $^{1}/_{424}$ Calorie, welche das thermische Aequivalent der Arbeitseinheit darstellt, und mit A bezeichnet wird, sind die Grundzahlen der mechanischen Wärmetheorie; durch dieselbe wurde nicht nur die Anschauung befestigt, daß die Wärme eine Arbeit, eine Massenbewegung, eine Bewegung der Moleküle ist, sondern es wurden auch auf mathematischem Wege vorher unbekannte Erscheinungen und Zahlen für die Wärme aufgefunden, die sich bei angestellten Versuchen als richtig ergaben und dadurch eine werthvolle Bestätigung der Theorie lieferten. Durch ähnliche, auf mathematischem Wege durchgeführte Betrachtungen sucht man immer tiefer in das Wesen der Wärme und anderer Naturkräfte einzudringen; einige Beispiele mögen wenigstens eine Idee von dem dabei beobachteten Verfahren geben.

Wenn wir eine Glasstange reiben, so wird sie heiß und elektrisch; weil sie heiß wird, dehnt sie sich aus und schiebt darum die ringsum liegende Luftmenge etwas fort. Die mechanische Arbeit des reibenden Armes hat sich dabei verwandelt in: 1. Wärme, 2. Elektricität, 3. größeres Volumen der Stange, 4. Fortschieben der Luft. Welche Arbeiten für die Wärme und das Fortschieben der Luft nöthig sind, läßt sich leicht berechnen; könnte man nun die zwei anderen Arbeiten auch noch finden oder durch unbekannte Größen ausdrücken, so müßte nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft die Summe der 4 consumirten Arbeiten gleich der von dem Arme producirten Arbeit sein. Hierdurch entstände eine Gleichung, durch deren Auflösung oder Verbindung mit anderen Gleichungen Schlüsse auf die Werthe der unbekannten Größen und dadurch auf die Eigenschaften der unerklärten Naturkräfte möglich werden könnten. Um die hierbei auftretenden Vorgänge einfach bezeichnen zu können, hat man sie eingetheilt; die Arbeit, welche zur Ueberwindung innerer Widerstände in Anspruch genommen wird, nennt man *innere Arbeit*; eine solche ist in dem betrachteten Beispiel die Vergrößerung des Volumens, da für diese Veränderung die Moleküle eines Körpers weiter von einander entfernt werden müssen und daher ihre An-

gebung jener entgegen überwunden werden muß. Die Arbeit, welche zur Ueberwindung äußerer Widerstände verwandt wird, heißt äußere Arbeit; eine solche ist z. B. beim bekannten Versuche das Fortschieben der Luft, da hierbei der Luftdruck auf einem großen Wege überwunden werden muß. Zu der inneren Arbeit gehört wahrscheinlich auch das Erzeugen der Elektricität, da hierbei die zwei sich anziehenden und neutralisirenden Elektricitäten von einander getrennt werden müssen. Die Wärme-Erzeugung wird nicht zur inneren Arbeit gerechnet, sondern als Erhöhung der lebendigen Kraft der Moleküle angesehen, wozu wohl Arbeit nöthig, aber nur die Trägheit, nicht aber eine innere Gegenkraft zu überwinden ist.

In diesem Beispiele wurden Temperaturveränderungen und Arbeitsmaß gemessen. Es gibt aber noch Fälle, ja noch [illegible] fruchtbare(?), die Gleichungen entstehen, wenn die Leistungen mit Wärmemaß gemessen, z. B. durch die dabei gleichwerthige Wärme gemessen werden, indem man einfach den Betrag ihrer Meterkilogramme mit [illegible] oder A multiplicirt; dies ist besonders dann zu empfehlen, wenn, wie es sehr häufig geschieht, die Arbeiten durch Wärme vollbracht werden. Wird z. B. ein gewisser Betrag von Calorien in das Wasser eines Dampfkessels geleitet, so wird das Wasser durch einen Theil derselben erwärmt; durch einen anderen Theil wird innere Arbeit geleistet, die Moleküle werden weiter von einander entfernt, das Wasser hierdurch ausgedehnt und in Dampf verwandelt; endlich wird vielleicht eine sehr große äußere Arbeit geleistet, indem der Kolben eines Dampfcylinders von dem Dampf fortgeschoben und hierdurch eine ganze Maschinenfabrik in Thätigkeit versetzt wird. Multipliciren wir diese äußere Arbeit mit A und addiren den so resultirenden Wärmebetrag der äußeren Arbeit zu der für die innere Arbeit und die Erwärmung verbrauchten Wärme, so muß diese Summe, vorausgesetzt, daß kein Wärmeverlust stattfindet, dem zugeführten Betrage von Calorien gleich sein, wodurch wieder eine der erwähnten fruchtbaren Gleichungen entsteht.

Auf diese Weise glaubt man sogar dem Verständnisse des inneren Wesens der Körper einen Schritt näher gekommen zu sein. Da jeder noch so kalte Körper nach aller Erfahrung immer noch kälter werden, also noch Wärme abgeben kann, so muß man annehmen, daß selbst die größte natürliche Kälte von — 70° und die größte künstliche Kälte von — 100°, die man beobachtet hat, immer noch Wärme ist, daß also die Moleküle immer noch in Bewegung sind, noch lebendige Kraft enthalten; und da sie noch in Bewegung sind, so können sie sich auch nicht unmittelbar berühren; es war daher auch Arbeit nöthig, um die sich anziehenden Moleküle in die vorhandene Entfernung von einander zu bringen; folglich enthalten die Moleküle auch Spannkraft, selbst bei jenen niedrigen Temperaturen. Indessen ist doch immerhin der Fall denkbar, daß die Moleküle eines Körpers vollkommen in Ruhe sind und sich unmittelbar berühren; da sie dann keine Spur von Wärme enthalten, so ist man berechtigt, jene nicht vorhandene, aber denkbare Temperatur den absoluten Nullpunkt zu nennen; wir werden später erkennen, daß derselbe 273° unter dem Gefrierpunkte des Wassers liegt. Bei jeder höheren Temperatur aber sind die Moleküle von einander entfernt, sie besitzen eine gewisse durchschnittliche Entfernung von einander, für welche Clausius den Namen Disgregation eingeführt hat; für diese Disgregation war eine gewisse Arbeit oder Wärme nöthig; die Moleküle enthalten demnach Spannkraft oder Energie der Lage; außerdem aber sind die Moleküle auch in Bewegung, wodurch sie die Temperatur des Körpers bilden; sie enthalten also auch Energie der Bewegung oder lebendige Kraft. Da man nun die Summe der lebendigen Kraft und der Spannkraft eines Körpers die Energie des Körpers nennt, so kann man den Satz aussprechen: Jeder Körper enthält unsichtbare Energie. Die Energie eines Körpers kann verändert werden, indem demselben Wärme oder Arbeit zugeführt, oder indem von ihm Wärme oder Arbeit abgegeben wird. Wenn es nun gelingt, die einem Körper zugeführte Wärme oder Arbeit zu zerlegen in einen Betrag, der die Temperatur oder lebendige Kraft oder Energie der Bewegung des Körpers erhöht hat, und in einen zweiten Betrag, der die Disgregation vermehrt, also die Spannkraft oder Energie der Lage erhöht hat, so ist hieraus auch wohl ein Schluß auf die schon vorher in ihm vorhanden gewesene lebendige Kraft und Spannkraft, und demnach auf seine Energie möglich, wodurch man dem Verständnisse seines Wesens näher kommen kann.

2. Allgemeine Eigenschaften.

37 Allgemeine Eigenschaften sind solche Eigenschaften, die allen Körpern ohne Ausnahme zukommen. Man unterscheidet sie in wesentliche oder nothwendige und in unwesentliche oder zufällige. Wesentliche Eigenschaften sind solche, ohne welche ein Körper nicht gedacht werden kann. Dieselben folgen aus dem Begriff der Materie, welche wir als das Raumerfüllende definirt haben. Darin liegt zuerst, daß ein Körper einen Raum einnimmt: die Ausdehnung, und sodann, daß der Körper diesen Raum auch ganz in Anspruch nimmt, ohne eine andere Verwendung desselben möglich zu lassen: die Undurchdringlichkeit. Hiermit sind indeß diese beiden Eigenschaften nicht erklärt. — Unwesentliche Eigenschaften sind solche, die wir zwar an allen Körpern finden, aber ohne daß sie zum Bestehen derselben nothwendig sind. Die wichtigsten derselben sind die Trägheit und die Beweglichkeit, d. h. die Eigenschaften, daß ein Körper seinen Raumzustand zwar nicht von selbst, aber durch eine äußere Einwirkung verändern kann. Auch diese Eigenschaften sind unerklärbare Grundeigenthümlichkeiten des Stoffes. Die übrigen unwesentlichen Eigenschaften, die Theilbarkeit, die Porosität, die Ausdehnbarkeit ergeben sich aus der inneren Bildung des Stoffes.

38 **1. Die Ausdehnung. Messen und Meßapparate.** Die Ausdehnung ist die Eigenschaft, daß jeder Körper einen Raum einnimmt. Die Größe des eingenommenen Raumes nennt man den Rauminhalt oder das Volumen des Körpers. Wie und wodurch dasselbe, sowie die Größe der Flächen und Linien gemessen wird, ist in 13 gelehrt worden.

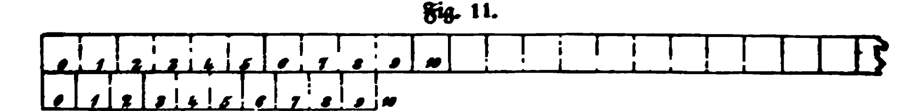
Zur genaueren Messung der Längen dienen die Maßstäbe, welche, wenn sie gerichtliche Geltung oder wissenschaftlichen Werth haben sollen, mit einem Musterstabe verglichen sein müssen. Dazu dient der Comparator. In demselben wirkt der an die Stelle des Musterstabes gelegte Maßstab auf den sehr kurzen einen Arm eines Winkelhebels, so daß bei der geringsten Abweichung das Ende des anderen sehr langen Armes einen bedeutenden Weg auf einer Gradeintheilung zurücklegen muß. Wenn das Metermaß in allen Ländern eingeführt werden soll, so muß für jedes Land ein Musterstab angefertigt und mit dem französischen Urmusterstab des Meters auf das genaueste verglichen werden; dieser Urmusterstab (étalon primitif) befindet sich, einmal von Platin und zweimal von Stahl, in den Kellern der Pariser Sternwarte; zur Vergleichung selbst dient das mètre des archives, ein Musterstab auf dem Längenbüreau. Der Musterstab Deutschlands ist 1,00000301 des mètre des archives, während der étalon primitif 1,00000329 des mètre des archives beträgt. Um die allgemeine Einführung des Metermaßes vorzubereiten, und um für die neue europäische Längen- und Breitengradmessung genaue Maßstäbe zu erwerben, wurde auf den Vorschlag der russischen Akademie und nach mehreren internationalen Conferenzen 1870 von den Regierungen aller civilisirten Staaten eine internationale Commission ernannt, welche die Vergleichung der an die verschiedenen Länder abzugebenden Musterstäbe besorgen sollte. Am 24. Sept. 1872 wurde von dieser Commission in Paris beschlossen, daß die neuen Maß-Prototypen von einem ständigen internationalen Bureau aus einer Legirung von 9 Th. Platin und 1 Th. Iridium aus einem Gusse angefertigt werden sollten; der Querschnitt solle die in Fig. 10 in natürlicher Größe abgebildete Gestalt haben, weil ein Stab von der bisherigen Form einer dicken Platte sich zu leicht biege und dadurch die Abstände der Theilstriche ändere, während diese Form es erlaube, die Theilstriche auf der neutralen Faserfläche des Stabes, der Grundfläche des oberen Kanales, anzubringen; sie sollten Strichmaße sein statt der bisher gebräuchlichen Endmaße, d. h. nicht die beiden Endflächen des Stabes sollten die Enden des Meters sein, sondern 2 Striche auf dem etwa 102^{c} langen Stabe, weil hierbei die Vergleichung mit dem Comparator viel genauer vorgenommen werden könne. Der Comparator für Strichmaße besteht aus einem Wagen, auf welchem die zu vergleichenden Stäbe neben einander liegen, und der bei der Vergleichung unter zwei Mikroskope mit Mikrometern gefahren wird, die in dem zu prüfenden Abstande von einander aufgestellt sind. Nach Wild (1874) vereinigt die von Tresca vorgeschlagene Querschnittsform

Fig. 10.

Fig. 14 [illegible] Hauptvorzug und eine große [illegible] bei [illegible] und eine sichere [illegible] der Temperatur der Umgebung; sie werden aber gar zu leicht von der [illegible] wegen der verwickelten Form große Schwierigkeiten in der [illegible] Darstellung. Zwar hat schon früher der [illegible] ausgesprochen, daß eine [illegible] gewählt werden möge, die nach ihrer chemischen [illegible] Zusammensetzung, [illegible] durch ihre Ausdehnungsverhältnisse alle Garantien für ihre [illegible], [illegible] im Laufe der Zeit ihren [illegible] nicht ändern, wenn z. B. [illegible] nach [illegible] Untersuchungen 18[illegible] nicht genügt. Nach all diesen Beziehungen befriedigt am meisten der Bandstahl, besonders wenn man, wie Neumann vorschlägt, den plattenförmigen Stab auf die Hochkante stellt; hierdurch wird nämlich die Biegung sehr gering, und die auf der Mitte der Breitenfläche angebrachte Skala befindet sich [illegible], ohne die verwickelte Querschnittsform Fig. 10, auf der neutralen Faser.

Die so erhaltenen Meterstäbe müssen nun genau getheilt werden; dies geschieht mittels der Theilmaschine (erfunden von dem Herzog von Chaulnes), welche darauf beruht, daß ein den Schneidestift tragender Schlitten durch die Drehung einer langen Schraubenspindel sehr gleichmäßig fortgeführt wird. Auf der Weltausstellung von 1867 befand sich eine mikrometrische Theilmaschine, mit welcher 1mm in 3000 Theile getheilt werden kann. Oefter benutzt man zu genaueren Messungen größerer Längen den Nonius oder Vernier (nach dem Erfinder). Derselbe ist ein an dem eigentlichen Maßstabe verschiebbarer kleiner Stab, welcher z. B. die Länge von 9 Maßabtheilungen in 10 gleiche Theile getheilt enthält; hierdurch wird jeder seiner Theile um $\frac{1}{10}$ der Maßstabtheile kleiner als diese, so daß diese Zehntel noch abgelesen werden können. (Siehe Fig. 11.)

Fig. 11.



Mikroskopisch kleine Gegenstände legt man unter dem Mikroskop auf Mikrometerplatten; Fraunhofer fertigte eine solche an, welche 32000 Theilstriche auf einem Zolle enthielt; die Robert'schen Platten enthalten mehrere Liniensysteme, in welchen sich 400 bis 4000 Linien auf 1mm befinden; Perreaux theilt mit seiner Theilmaschine 1mm in 3000 Theile.

Die Dicke sehr dünner Platten und Drähte mißt man mit dem Sphärometer. Dasselbe besteht aus einer Mikrometerschraube, welche bei einer Umdrehung z. B. um 1mm, bei 1° Umdrehung daher um $\frac{1}{360}$mm fortrückt. — Zum Messen und Auffinden größerer Höhenunterschiede an Gebäuden und im Freien bedient man sich der Nivellir-Instrumente. Das einfachste von Bauleuten gebrauchte ist die Setzwage mit Richtscheit, der Pflasterer und Straßenbauer benutzt die Wasserwage, und der Eisenbahnbauer und Geometer das eigentliche Nivellirinstrument, bestehend aus Fernrohr mit Fadenkreuz und einer Libelle. Zum wissenschaftlich genauen Messen kleiner Höhenunterschiede an Apparaten dient das Kathetometer, das aus einem auf einem verticalen Maßstabe verschiebbaren und mit einem Nonius versehenen Fernrohre besteht. Zur Winkelmessung auf dem Papiere und an Gegenständen dienen der Transporteur und das Goniometer; auf dem Felde benutzt man die Boussole (s. 449) und den Meßtisch, einen Zeichentisch mit einem drehbaren Fernrohre, bei dessen Drehung sich ein auf dem Tische liegendes Lineal mitdreht; auf dem Felde und für den Himmelsraum benutzt man den Theodolith, ein Fernrohr, das um die Mittelpunkte eines horizontalen und eines verticalen mit Gradeintheilung versehenen Kreises drehbar ist.

39 **Größte und kleinste Ausdehnung.** Die größte Ausdehnung von den uns bekannten Körpern nehmen die Kometen ein; einige füllen Millionen von Meilen am Himmel aus; doch scheinen sie nicht aus zusammenhängender Körpermasse zu bestehen. Dann folgen die Fixsterne oder Sonnen, von denen unsere Sonne, wahrscheinlich eine der kleineren, einen Durchmesser von 190 000 Meilen hat. Einige Sonnen, z. B. der Sirius, haben nach Bessel fast ebenso große dunkle Begleiter. Die 8 großen Planeten, die größten planetarischen Begleiter unserer Sonne, sind viel kleiner, 600 bis 20 000 Meilen dick; auch die Monde besitzen nur Durchmesser von Hunderten von Meilen, die bis jetzt bekannten 170 Planetoiden 3—60 Meilen. Unser ganzes Sternsystem, von dem Milchstraßenringe umzogen, hat nach Mädler eine Größe von 7700 Jahren Lichtzeit. Merkwürdiger noch erscheinen uns die Körper von kleinster Ausdehnung. Nach Ehrenberg gehen auf 1 c" 40 000 Millionen von Infusionsthierchen. Solche Thierchen haben einen Magen, auf

dessen Wänden feine Flimmerhaare sich schwingend bewegen und hierdurch den Kreislauf des Nährsaftes erzeugen. Bedenkt man nun noch, daß die Bildung der Haare sehr verwickelt ist, und daß jedes Haartheilchen als organischer Stoff aus vielen Atomen verschiedener Elemente besteht, so erhält man einen ungefähren Begriff von der Kleinheit der Atome und kann sich dann nicht wundern, daß Zuckerwasser und Salzwasser unter dem Mikroskop ganz klar erscheinen. In 1 cmm Blut sind 5 Millionen Blutkörperchen enthalten. Ist in einer Flamme nur 1/3000000 Milligramm Natrium enthalten, so kann man dies mit dem Spectroskop noch wahrnehmen.

Gestalt. Die Art der Begrenzung eines stofferfüllten Raumes bildet die Gestalt eines Körpers. Unabhängige Flüssigkeiten und wahrscheinlich auch große Massen von jedem Stoffe nehmen, wie sich später ergeben wird, durch den Einfluß der inneren Kräfte Kugelgestalt an. Kleinere Massen von festem Stoffe haben ebenfalls durch ihre inneren Kräfte bestimmte Gestalten, wenn sie bei ihrer Entstehung in leicht bewegliche Theilchen zerlegt waren und allmälig in den festen Zustand übergingen. Sie bilden dann Individuen, selbständige Gestalten, wie die Pflanzen und Thiere, sind von ebenen Flächen regelmäßig umschlossen, und werden Krystalle genannt. 40

Krystalle entstehen demnach, wenn flüssige Massen langsam in den festen Zustand übergehen, also wenn ein geschmolzener Körper langsam erkaltet, oder wenn das Lösungsmittel eines gelösten Stoffes langsam verdampft oder anderweitig beschäftigt wird, oder wenn eine heiße gesättigte Lösung eines in der Kälte weniger löslichen Stoffes sich langsam abkühlt u. s. w. Es finden sich daher natürliche Krystalle vorwiegend in Höhlen und Mandelräumen, oft auch in Trümmergestein und in Schwemmland. Auch in den Zellen, den Elementargebilden der Pflanzen- und Thierwelt, auf Schmetterlingsflügeln u. dgl. finden sich krystallähnliche Gestalten. Die Chemie und die chemische Technik erhalten ihre Producte meist aus Lösungen, daher auch meist in Krystallen. Solche Stoffe, welche unlöslich sind, aber durch Zusammenbringen von Lösungen als sogenannte Niederschläge entstehen, erscheinen nur selten als Krystalle, und dann in mikroskopisch kleinen Gestalten, wie z. B. Kaliumplatinchlorid. Die meisten Niederschläge sind amorph. In neuester Zeit (1866) hat Fremy solche dadurch krystallisirt erhalten, daß er die Fällung künstlich verzögerte. Es wurden z. B. die zusammenzubringenden Lösungen mit Gummi, Zucker, Gelatine vermischt und dann durch eine poröse Scheidewand in Verbindung gesetzt, an welcher sich nun sehr langsam schöne Krystalle von z. B. schwefelsaurem Barium, das sonst als Pulver zu Boden fällt, ansetzten. Hieraus folgt, daß auch in der Natur diese Krystalle durch solche lang andauernden Vorgänge, also aus sehr verdünnten Lösungen entstanden sein können, was für die neueren geologischen Anschauungen spricht. Jedoch hat Scheerer (1873) auch Krystalle von Schwerspath und Flußspath erzeugt, indem er schwefelsaures Barium und Fluorcalcium in Wasser von 300°, also unter einem Drucke von mehr als 30 Atmosphären löste, was für die älteren geologischen Anschauungen spricht. In manchen Fällen bilden sich durch Sublimation Krystalle, wie z. B. aus Joddampf.

Gehen die angeführten Krystallisationsprocesse nicht langsam vor sich, so bilden sich zahllose kleine Krystalle, Krystallkeime, die sich gegenseitig in der Ausbildung hemmen; es entsteht das krystallinische Gefüge. Die meisten Urgebirge wie z. B. Urkalk, die plutonischen Gebirge wie Porphyr, und die vulkanischen Gebirge wie z. B. Basalt, sind krystallinisch. Man folgerte auch hieraus die Entstehung derselben aus geschmolzener Masse. Neuere Geologen behaupten indeß, der krystallinische Zustand könne durch die unendlich vielen zitternden Bewegungen, welche die Erde immer aufnimmt (s. 36) entstanden sein und noch immer entstehen, wie zähes, faseriges Schmiedeeisen sich durch Erschütterungen in sprödes, körniges Eisen umwandele; oder es könnten sich die Massen der genannten Gebirge an der Stelle anderer allmälig durch Sickerwasser gelösten Massen ebenso allmälig aus diesem Wasser abgesetzt oder chemisch ausgeschieden haben und dadurch krystallinisch geworden sein.

Wenn die erwähnten Erstarrungsprocesse zu rasch vor sich gehen, so können auch keine Krystallanfänge gebildet werden: die entstehende Masse ist amorph. Eine geschmolzene Masse behält dann das Gepräge der Schmelzung bei, wird also glasig amorph; die gelöste Masse fällt in ihren einzelnen Theilchen nieder, wird erdig amorph. Solche Massen entstehen auch, wenn krystallinische Stoffe zertrümmert werden. Da nun die Uebergangs- und die Tertiär-Gebirge meist aus zertrümmerten und weggeschwämmten Massen bestehen, wie der Bodengrund, so sind dieselben erdig amorph. — Ist eine Flüssigkeit von gallertiger Beschaffenheit, wie Leimlösung, Kieselsäure, Aluminiumhydroxyd, erhitzte Gummi-Arten, geschmolzene Glasmasse, gluthweiche Metalle, so haben die Theilchen keine leichte Beweglichkeit; es können sich daher beim Festwerden keine Krystalle bilden, selbst dann nicht,

wenn Verdunstung oder Abkühlung langsam geschehen. Graham nennt die hierher gehörigen Stoffe Kolloide (κόλλα = Leim und εἶδος = Form) und im Gegensatze hierzu diejenigen Stoffe, welche krystallfähige Flüssigkeiten bilden, Krystalloide. Die Kolloide behalten auch, wenn sie fest geworden sind, meist den gallertigen Anschein, wie Opal, fester Leim, Gummi-Arten, Glas u. s. w. und haben auch dann in ihren inneren Eigenschaften manche Aehnlichkeit mit Flüssigkeiten.

Manche Stoffe, z. B. Schwefel, können bei verschiedener Methode der Krystallisation verschiedene Gestalten annehmen; man nennt sie dimorph, allgemeiner polymorph. Im Gegensatze dazu gibt es Körper von verschiedenem Stoffe, die gleiche Krystallform annehmen, wie z. B. die verschiedenen Alaune; solche Körper nennt man isomorph. Sie zeigen übrigens doch eine große Analogie in ihrer chemischen Zusammensetzung, bestehen aus ähnlichen Verbindungen sehr ähnlicher Stoffe; außerdem hat man kleine Abweichungen in den Winkeln wahrgenommen. Hieraus, sowie aus der ganzen Krystallographie erhellt das Gesetz, daß jedem unorganischen Stoffe eine bestimmte Krystallgestalt ebenso eigenthümlich ist, wie jedem Pflanzen- und Thierkörper eine individualisirte Gestalt zugehört.

Doch hat man erst in der neuesten Zeit (Albrecht Schrauf in Wien 1867) angefangen, die Krystallform der Stoffe aus ihrer chemischen Constitution abzuleiten, weiß also doch wenigstens, daß von dieser die Gestalt abhängt und herrührt. Wodurch und wie aber die Gestalten der organischen Körper, der Pflanzen und Thiere, entstehen, ist ganz und gar unbekannt. Da überdies die Embryone der Pflanzensamen ebenso mit einander übereinstimmen, wie die Eier der Thiere, so ist es nicht einmal ausreichend, in den Samen und Eiern eine Lebenskraft anzunehmen, sondern es muß sogar einstweilen noch in jedem Samen und in jedem Ei eine individuelle Kraft vorausgesetzt werden, um die verschieden gestalteten und verschieden gearteten Producte jener gleichen Anfänge begreiflich zu finden. Dem gegenüber hat Darwin in der neueren Zeit den Satz zu begründen gesucht, daß äußere Verhältnisse, sogenannte natürliche Zucht, Formänderungen hervorbringen könnten, woraus wieder Andere geschlossen haben, daß alle Formen durch allmälige Umänderungen der einfachsten Urformen mittels der natürlichen Zucht entstanden seien. Ob es auf diesem Wege je gelingen wird, die Entstehung der Pflanzen- und Thierformen zu erklären, muß um so mehr dahin gestellt bleiben, als man ja noch nicht einmal die Gesetze dieser Gestalten kennt, ausgenommen etwa die Goethe'sche Metamorphose und das Schimper'sche Gesetz der Blattstellung, und als es noch nicht gelungen ist, die Entstehung der Zelle, des Grundgebildes aller Pflanzen- und Thierkörper, durch physikalische und chemische Kräfte zu erklären. Nur das ist allbekannt, daß die meisten Thierkörper seitlich symmetrisch d. h. aus zwei gleichen, aber nicht congruenten Hälften, gestaltet sind, daß manche Thiere, wie die Strahlthiere, noch größere Regelmäßigkeit, ähnlich der Blattstellung der Pflanzen, zeigen, und daß bei höheren Thieren, wie beim Menschen die Theilung der ganzen Gestalten und der einzelnen Glieder hauptsächlich das Gesetz des goldenen Schnittes zu befolgen scheint. In letzter Zeit ist dem Physiologen Traube die Erzeugung künstlicher Zellen und das Wachsthum derselben durch Intussusception gelungen.

41 2. **Die Undurchdringlichkeit** ist die Eigenschaft, daß ein Körper sich nicht gleichzeitig mit einem anderen in demselben Raume befinden kann. Soll also ein Körper den Raum eines anderen einnehmen, so muß er denselben zuerst von seiner Stelle verdrängen. Schon der Tastsinn gibt uns von dieser Eigenschaft Kunde; wir erfahren einen Widerstand, wenn wir uns an die Stelle eines anderen Körpers setzen wollen; dieser auf unseren Tastsinn ausgeübte Widerstand ist sogar der einzig untrügliche Beweis für das materielle Dasein der Körper, da alle anderen Sinne der Täuschung ausgesetzt sind. Dieser Widerstand wächst mit der zu beseitigenden Masse. Beim Gehen in ruhiger Luft spüren wir denselben gar nicht; fühlbarer wird er schon, wenn wir heftigem Winde entgegen gehen, oder wenn wir durch Wasser gehen; der größte Theil der Kraft der Dampfschiffe und auch ein großer Theil der Kraft einer Locomotive wird dazu verwendet, Wasser, resp. Luft zu beseitigen, um deren Stelle einzunehmen.

Noch viele Erscheinungen beweisen uns die Undurchdringlichkeit. Werfen wir einen Körper in ein Wassergefäß, so steigt das Wasser um das Volumen des Körpers; man benutzt dies, um mittels graduirter Wassergefäße das Volumen unregelmäßiger Körper zu finden. Wenn beim Lösen eines festen Körpers oder beim Vermischen von Flüssigkeiten oder beim Verschlucken von Gasen durch feste Körper oder Flüssigkeiten der betreffende Raum sich nicht oder nur wenig vergrößert, so beruht dies nicht auf einer etwaigen Durchdringlichkeit der Körper, sondern darauf, daß die Moleküle des einen Stoffes sich in die

molekularen Zwischenräume des anderen Stoffes lagern. — Auch die Luft ist undurchdringlich, wenn wir auch leicht in dieselbe eindringen können; ein luftdicht schließender Kolben läßt sich nie bis auf den Boden des Cylinders drücken; dies beweist, daß die Luft, wenn auch zusammendrückbar, doch undurchdringlich ist. Legt man ein mit einem brennenden Kerzchen versehenes Korkstück auf Wasser und stülpt ein großes Glas darüber, so sieht man das Kerzchen noch brennen, wenn auch das Glas tief unter das Wasser gedrückt ist. Zwar wird die Luft durch den Wasserdruck zusammengepreßt und daher das Kerzchen in dem Glase etwas gehoben; allein die Luft wird nie vom Wasser verdrängt. Darauf beruht die Taucherglocke. Früher hatte dieselbe die Form einer Glocke; später wurde sie nach Smeaton in Form länglich vierseitiger Kasten von Gußeisen, mit Bänken im Inneren für die Arbeiter und ihre Werkzeuge angefertigt; in die obere Seite mündete ein Schlauch, durch welchen eine Compressionspumpe frische Luft in die Glocke preßte, während die innere halbverdorbene Luft am unteren Rande in Blasen entwich. In neuester Zeit verwendet man statt der Taucherglocken Kautschuk-Kleidungen, Skaphander genannt, welche den ganzen Körper wasserdicht umhüllen, vor den Augen starke Glasfenster und vor dem Munde ein Kautschukrohr zum Athmen tragen. — Durch einen engen und eng anschließenden Trichter läuft die Flüssigkeit gar nicht, weil die Luft der Flüssigkeit nicht Platz machen kann. Gußformen müssen Luftlöcher haben, damit die Luft entweichen kann. Durch eine enge Oeffnung am Boden eines Gefäßes fließt eine Flüssigkeit sehr langsam oder gar nicht aus, weil in dieser Oeffnung aufsteigende Luft und abfließende Flüssigkeit nicht gleichzeitig vorhanden sein können. — Läßt man nach der herrschenden atomistischen Ansicht den Stoff aus räumlichen Atomen von einiger, wenn auch noch so unbedeutender Größe bestehen, so schreibt man denselben hiermit auch Ausdehnung und Undurchdringlichkeit zu, erklärt also diese beiden Eigenschaften nicht. Indessen gibt es auch Forscher, welche die Atome als bloße Stoffpunkte ohne Größe und Gestalt, als stofflose Sitzpunkte der materiellen Kräfte ansehen. Thut man dies, so kann man jene beiden Eigenschaften auf folgende Weise erklären: Will man ein Atom aus seiner Verbindung mit den übrigen Atomen herausreißen, so widersteht dem die Anziehung der übrigen Atome; will man es in dieselbe hineindrücken, so widersteht die lebendige Kraft der Atome oder die Abstoßung der Aetheratome. Dies erklärt die Undurchdringlichkeit. Da nun dieselbe an dem ganzen Umfange eines mit Atomen erfüllten Raumes stattfinden muß, so ist hiermit auch die Ausdehnung erklärt.

3. Die Theilbarkeit ist die Eigenschaft, daß jeder Körper sich durch mechanische Verrichtungen, wie Schlagen, Stoßen u. s. w. in kleinere Körper zerlegen läßt. Die Theilbarkeit ist uns ein Beweis von der inneren Getheiltheit des Stoffes; denn wäre derselbe, wie die Dynamisten und viele Philosophen annehmen, innerlich ungetheilt, ununterbrochen, ein Continuum, so würde ein Körper durch Auseinanderziehen zwar immer dünner und dünner, bis ins Unendliche feiner und lichter, nie aber zerrissen werden können. Nach der atomistischen Ansicht erklärt sich dagegen die Theilbarkeit einfach dadurch, daß die theilende Kraft größer sein kann als die Anziehung der Theilchen gegen einander. 42

Die kleinsten Theilchen, welche künstlich erhalten werden können, werden Massentheilchen oder Partikeln genannt. In den meisten Fällen müssen dieselben noch aus vielen Molekülen oder Atomen bestehen, besonders dann, wenn bei weitgehenden künstlichen Theilungen der Zusammenhang noch nicht aufgehoben ist, wie z. B. in folgenden Fällen: Mit einem Dukaten kann man Roß und Reiter vergolden. — Die Lyoner Goldtressen haben eine Vergoldung von $^1/_{100000}$ mm Dicke; man fertigt sie an, indem man einen vergoldeten Silberstab von 3 cm Dicke und 20 cm Länge zu einem Drahte von 100 Meilen Länge auszieht; der Goldüberzug dieses Drahtes erscheint selbst unter dem Mikroskop noch zusammenhängend. — Der Wollaston'sche Platindraht ist $^1/_{10000}$ cm dick und wird nur durch Glühen sichtbar; er wurde angefertigt, indem man einen silberumgossenen Platindraht höchst fein auszog und dann das Silber durch Salpetersäure entfernte. — Auch die Nobert'schen Platten, das Fraunhofer'sche Mikrometer und das Millimeter-Glas von Perreaux sind Beispiele weitgehender künstlicher Theilung. Noch weiter geht offenbar die natürliche Theilung, wie bei der Lösung (1 Theil Fuchsin färbt 1 Million Theile Wasser noch deutlich roth), der Ausbreitung von Riechstoffen (Moschus in einem Dom, Rosmarin am Mittelmeer), der Diffusion der Luftarten. Diese Theilung ist wahrscheinlich eine Zerlegung bis in die Moleküle.

4. Die Porosität ist die Eigenschaft, daß die Körper Lücken haben, welche mit anderem, als dem Körperstoffe, gewöhnlich mit Luft oder Wasser erfüllt sind. So wie man an Schwamm und Brod, im Inneren von Binsen oder Palmenholz 43

mit bloſem Auge größere und kleinere Lücken wahrnimmt, ſo finden ſich noch viel zahlreichere, aber ſehr kleine und unſichtbare Lücken in jedem feſten Körper; und dieſe Lücken nennt man Poren. Wo man dieſelben nicht mit dem Mikroſkop wahrnehmen kann, laſſen ſie ſich durch Verſuche nachweiſen. Macht man ein ſehr dichtes Holz, das ſcheinbar keine Poren hat, zum Boden einer hohen Röhre und füllt dieſe mit Queckſilber, oder pumpt man unter einem Queckſilber enthaltenden Gefäße aus ſolchem Holze die Luft weg, ſo regnet das Queckſilber durch das Holz, wodurch die Poroſität desſelben offenbar wird. Manche Körper zeigen ſich dadurch porös, daß ſie, in Flüſſigkeit gelegt, Luft entwickeln, wie Kalk, oder durchſcheinend werden, wie Hydrophan, Nephelin u. ſ. w. Die Poroſität von Steinen wird beſonders durch die ſchönen Pettenkofer'ſchen Verſuche (1861) deutlich. Werden auf zwei gegenüberliegenden Stellen einer dicken Sandſteinplatte oder Backſteinmauer Röhren hermetiſch aufgeſetzt und alle übrigen Stellen luftdicht mit Gyps und Harz bekleidet, ſo kann man mit der einen Röhre Luft in die andere blaſen, als ob kein Stein vorhanden wäre, z. B. ein Licht ausblaſen oder Leuchtgas durch die Mauer leiten, ſo daß auf der anderen Seite eine meterlange Flamme entſteht. — Die Poroſität der Metalle beweiſt man durch den Verſuch der Florentiniſchen Akademie (1661). Dieſelbe füllte eine hohle Goldkugel mit Waſſer und gab derſelben dann durch eine ſtarke Preſſung eine Formänderung. Da nun, wie die Mathematik beweiſt, von allen Körpern mit gleich großer Oberfläche die Kugel den größten Inhalt hat, ſo muß bei einer Formänderung der Inhalt kleiner werden; wirklich bedeckte ſich bei dieſem Verſuche und den häufigen Wiederholungen desſelben die Kugel mit Schweiß.

Die Entſtehung der Poren erklärt ſich dadurch, daß die Körper nicht aus Haufwerken von regelmäßig eng zuſammen gelagerten Molekülen beſtehen, ſondern daß die Moleküle meiſtens erſt zu gewiſſen Elementargebilden zuſammentreten. In der organiſchen Welt bilden ſich Zellen und Faſern und in der Steinwelt Kryſtallkeime. Wenn ſich dieſe Elementargebilde an einander legen, ſo müſſen zwiſchen denſelben Lücken bleiben, welche die Poren bilden. Da jene Elementargebilde immer noch kleiner ſind als die kleinſten Pulverkörnchen, ſo müſſen künſtlich aus gepulvertem Stoffe zuſammengepreßte Körper, wie künſtlicher Graphit, Thongefäße u. dgl., ſowie die aus Waſſer abgeſetzten Boden- und Steinſchichten, die größten Poren beſitzen; nach dieſen Körpern werden hinſichtlich der Größe der Poren wohl erſt die organiſchen Stoffe und die kryſtalliniſchen und kryſtalliſirten unorganiſchen Körper folgen. Die Flüſſigkeiten und Luftarten haben leicht bewegliche Maſſentheilchen, welche in jede Lücke hineinrollen müſſen, können daher Poren im gewöhnlichen Sinne nicht beſitzen; ſie haben aber große Molekularzwiſchenräume, ſo daß Flüſſigkeiten ſich innig mit einander vermiſchen und Luftarten einſaugen können, und daß die Luftarten ſich leicht gegenſeitig durchdringen, ſich in einander ausbreiten oder diffundiren können. Demnach verhalten ſich Luftarten und Flüſſigkeiten ſehr porös, ohne Poren im gewöhnlichen Sinne zu beſitzen. Diejenigen feſten Körper aber, welche aus gallertigen Flüſſigkeiten entſtanden ſind, die Kolloide, haben wegen ihrer Entſtehung keine Elementargebilde und daher auch keine größeren Lücken, keine eigentlichen Poren; auch ihre Molekularzwiſchenräume können, da ſie feſte Körper ſind, nur klein ſein. Demnach müſſen die Kolloide, wie Glas, Gummi-Arten, gehämmerte ſchweißbare Metalle die geringſte Poroſität haben. Wenn dieſe Stoffe dagegen erwärmt und dadurch weich werden, ſo ſind ihre Theilchen leichter beweglich; daher können Gaſe, welche ſtark diffundiren, wie Waſſerſtoff, oder welche eine Art chemiſcher Anziehung von den Kolloiden erleiden, in großer Menge in dieſelben eindringen, und zwar in ſo großer Menge, daß dieſe Gaſe nach Grahams Unterſuchungen (1866) wahrſcheinlich ſogar flüſſige oder feſte Form annehmen und bei der Abkühlung von den feſten Körpern eingeſchloſſen und durch Anziehung feſtgehalten werden. So ſchließt geſchmiedetes Platin bei der Rothgluth ſein 4 faches Volumen Waſſerſtoff ein, geſchmolzenes viel weniger, geſchmiedetes Palladium gar ſein 600 faches Volumen Waſſerſtoff, Eiſen ſein 4 faches Volumen Kohlenoxyd, Silber viel Sauerſtoff. Bei geringerer Temperatur iſt die Menge der abſorbirten Gaſe viel kleiner. Kryſtalliniſche Metalle wie Antimon ſchließen gar kein Gas ein, weil die Poren derſelben ſo groß und zahlreich ſind, daß das eingedrungene Gas durch Reflexion ſofort wieder entweicht. Graham unterſcheidet hiernach drei Arten von Poren: 1. Poren, welche in Wänden offene Kanäle bilden, ſo daß Gaſe einfach, vermöge

ihres Ausbreitungsbestrebens durch dieselben gehen, wie die Poren von künstlichem Graphit. 2. Poren, welche von Gasen nur mit Hilfe eines äußeren Druckes oder der Anziehung der Porenumgebung durchdrungen werden, wie die Poren von Holz und Stein. 3. Poren, welche vermöge einer Art chemischer Anziehung des Körperstoffs Gase einschließen, so daß diese flüssig werden. Sie finden sich in Kolloiden, verarbeiteten Metallen und Flüssigkeiten und sind wahrscheinlich nur die Molekularzwischenräume dieser Körper. Vergleicht man das Gewebe der Moleküle etwa mit einem Fischernetze, so sind die letzteren Poren mit den Maschen desselben, die ersten zwei Arten mit größeren oder kleineren in das Netz gerissenen Löchern vergleichbar.

5. Die Trägheit (Galilei 1638) ist die Eigenschaft, daß ein Körper seinen Zustand nicht von selbst ändern kann. Es gilt dies zwar für alle nur denkbaren Zustände; da jedoch alle Zustandsänderungen Bewegungsänderungen sind, so ist kein Zustand ausgeschlossen, wenn wir den Begriff der Trägheit beschränken auf das unthätige Verharren des Stoffes im Zustande der Ruhe oder im Zustande der Bewegung. Ist ein Körper in Ruhe, so bleibt er so lange in Ruhe, bis eine Kraft auf ihn einwirkt. Ist er in Bewegung, so kann an diesem Bewegungszustande nur durch eine Kraft etwas geändert werden: der Körper muß daher, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt, mit unveränderter Geschwindigkeit in gerader Linie ins Unendliche gehen. Man nennt diese zwei Sätze zusammen auch das Gesetz der Trägheit. Wir haben dasselbe schon (in 15.) unter dem Namen des ersten Newton'schen Gesetzes der Mechanik kennen gelernt, müssen jedoch hier seine Consequenzen weiter ausführen. **44**

Für den Zustand der Ruhe ist das Gesetz der Trägheit sofort einleuchtend; denn wir erfahren oft genug, daß ein ruhender Körper zur Fortbewegung einer Kraft bedarf. Besonders auffallend wird dies, wenn eine Kraft nur auf einen Theil eines Körpers oder einer Körperverbindung wirkt; alsdann wird dieser Theil in Bewegung versetzt, der andere Theil aber nicht, weil sich die Wirkung einer Kraft nicht momentan auf alle Theile fortpflanzt, sondern einer gewissen, wenn auch noch so kleinen Zeit bedarf, um von Theilchen zu Theilchen fortzuschreiten. Wenn wir z. B. in einem ruhenden, aber dann plötzlich abfahrenden Kahne oder Wagen nach vorwärts sitzen, so fährt unser Oberkörper scheinbar zurück, d. h. er bleibt noch in Ruhe zurück, während der Unterkörper sich voran bewegt. — Wenn auf einem Kartenblatte direct über der Mündung einer Flasche eine Münze liegt und das Blatt weggeschnellt wird, so fällt die Münze in die Flasche, weil die Bewegung der Karte so rasch vor sich geht, daß sie sich der Münze nicht mittheilen kann. Aehnliche Erscheinungen sind: das Abschlagen von Mohnköpfen mit einem Stocke und das Ausfließen von Wasser aus einer schnell seitwärts gezogenen Schüssel. — Schießt man eine Kugel durch eine Fensterscheibe, so entsteht ein Loch, ohne daß die Scheibe zersplittert, was bei einem weniger heftigen Schlage geschieht. Ebenso kann man durch ein Brett, das nur leicht in lockeren Boden gestellt ist und durch einen Fingerstoß umgeworfen werden kann, eine Kugel schießen, ohne es umzuwerfen. Eine Thonpfeife, die auf zwei wagrecht gespannten Haaren ruht, kann durch einen kräftigen Hieb entzweigeschlagen werden, ohne daß die Haare zerreißen. — Ein Faden, der bei ruhigem Heben ein schweres Gewicht zu tragen vermöchte, reißt ab, wenn man mit einem Ruck heben will. — Explosive Stoffe, die zu schnell explodiren, wie Knallsilber, Jodstickstoff, Schießwolle u. s. w. sind nicht zum Schießen brauchbar, weil nicht Zeit genug zur Uebertragung der Bewegung auf die Kugel vorhanden ist und daher die Geschütze zerspringen. Ebenso reißen die Zugstränge eines Wagens, wenn die Pferde beim Abfahren zu rasch und ruckweise ziehen. — Daraus folgt, daß jede wirklich momentane Kraft, d. i. eine solche, die nur in einem Zeitpunkte wirken würde, bei ziehender Wirkung nur das erste Atom des gezogenen Körpers abreißen und bei drückender Wirkung das erste und dadurch auch die folgenden Atome in eine blos schwingende Bewegung versetzen könnte. Eine momentane Kraft nach dem gewöhnlichen Sinne aber, wie etwa der Stoß, dessen Wirkung noch immer eine, wenn auch noch so geringe Zeitdauer hat, wird zwar ebenfalls zitternde Bewegungen, aber auch eine fortschreitende hervorrufen, weil das erste gestoßene Atom wegen der Fortdauer des Stoßes nicht zurückkehren kann, sondern seine Bewegung den folgenden mittheilen muß. Diese fortschreitende Bewegung kann sich aber nur auf die nächsten Massen fortpflanzen, weil sie durch die entstehenden, unvermeidlichen Schwingungen bald aufgezehrt wird. Darauf beruht die so wichtige Wirkung des Stoßes. Alles Schlagen, Stechen, Hämmern, Klopfen, Reißen, Feilen, Hobeln, das Einrammen der Pfähle u. s. w. wirkt nur dadurch, daß eine große lebendige Kraft sich nicht in einem Augenblicke auf alle nahe und ferne liegenden Massen übertragen kann.

gleich sind, so könnte eine Maschine zu einem **Perpetuum mobile** werden, wenn es eben keine Hindernisse der Bewegung, keine Reibung gäbe. Diese Erscheinung tritt aber bei jeder Bewegung auf; die hervorragenden Theilchen eines bewegten Körpers fassen die hervorragenden Theilchen der denselben berührenden Körper, reißen sie ein wenig mit fort, lassen sie dann los und versetzen dieselben so in Schwingungen, durch welche ein Theil der sichtbaren lebendigen Kraft des bewegten Körpers in unsichtbare der Moleküle verwandelt wird; so wird allmälig die vorhandene lebendige Kraft aufgezehrt; das **Perpetuum mobile** ist unmöglich, weil die Reibung allmälig jede lebendige Kraft und jede Spannkraft sich berührender Körper in Schwingungen umwandelt. Anfänglich mögen es große und langsame Schwingungen sein, die den Schall bilden, der sich bei der Reibung verbreitet. Diese größeren und langsameren Schwingungen aller schallenden und tönenden Körper mögen sich wohl in die Erde fortpflanzen und dort mancherlei Arbeiten vollbringen, z. B. die geschichteten Steine in krystallinische umwandeln; jedoch müssen die weit ausgreifenden Theilchen auch auf einander schlagen, versetzen sich hierdurch in kleinere und schnellere Schwingungen, gehen also theilweise in Wärme über. Schließlich wird auf diese Weise die meiste Arbeit in Wärme umgewandelt, die in den kalten Weltraum hinausstrahlt und dort zerstreut wird; durch Nichtbeachtung dieses Vorganges entsteht der Schein, als ob Arbeit vernichtet werden könnte.

Die Erzeugung von Wärme durch Reibung, welche unsere Streichhölzchen entzündet und die Wagenachsen bis zum Glühen erhitzt, die Entstehung von Wärme durch Stoß oder Schlag, vermittelst welcher ein kräftiger Schmied einen Nagel glühend hämmern kann, die Erzeugung von Wärme durch Zusammendrücken z. B. von Luft, welche im pneumatischen Feuerzeug, in dem Rammbär, in den Sternschuppen und Feuerkugeln zur Wirkung kommt, ist eine Verwandlung von sichtbarer lebendiger Kraft in unsichtbare. Die bedeutendste künstliche Wärmequelle aber, die Verbrennung, oder richtiger gesagt, die chemische Vereinigung, ist eine Verwandlung unsichtbarer Spannkraft, der chemischen Affinität, in unsichtbare lebendige Kraft, in Wärme. Wie schon erwähnt, entsteht diese Spannkraft im Kohlenstoff der Pflanzen und im Sauerstoff der Luft durch die lebendige Kraft der Sonnenstrahlen oder der Aetherschwingungen, welche an den Pflanzen das Kohlendioxyd zersetzt, den Kohlenstoff in die Pflanzen und den Sauerstoff in die Luft führt; jeder Baum, noch mehr indeß jedes Steinkohlenlager aber ist, einem Bergsee vergleichbar, ein Reservoir von unsichtbarer Spannkraft. Kommt ein Stück Kohle unter geeigneten Umständen mit Luft in Berührung, so stürzen die Sauerstoffmoleküle mit ihrer lebendigen Kraft auf das Kohlenstück los, vereinigen sich mit Kohlenstoffatomen, geben aber hierbei ihre lebendige Kraft großentheils an die Moleküle des Kohlenstückes ab, und erhitzen so dasselbe immer mehr und mehr. Geschieht dies unter dem Kessel einer Dampfmaschine, so geht die Wärme in das Wasser über, ihre lebendige Kraft verwandelt sich in die Spannkraft des Wasserdampfes, die einzige Spannkraft, die wir schon deutlich als lebendige Kraft erkannt haben. Durch die Dampfspannung wird eine Dampfmaschine und durch diese z. B. eine Anzahl von Arbeitsmaschinen einer Möbelfabrik getrieben; es entsteht also wieder lebendige Kraft. Die lebendige Kraft der Sägemaschine, der Hobel- und Bohrmaschine vollbringt Arbeit; aber hier scheinen wir an der Grenze der Verwandlungen angelangt, die Arbeit scheint verloren zu sein. Allein einerseits entsteht durch die Erschütterungen der Arbeitsmaschinen und ihre Reibung ein großer Betrag von Schwingungen, der schließlich in Wärme übergeht; andererseits wurde oben erwähnt, daß die Spannkraft des Kohlenstoffs nur unter geeigneten Umständen wirksam werden kann. Ein Steinkohlenlager, ein Baum erhitzen keinen Dampfkessel, sie müssen zerkleinert und transportirt werden, und erfordern eine um so größere Vorerhitzung zum Verbrennen, je größer die Stücke sind. Die Möbelfabrik dagegen erzeugt Hobelspähne, welche nach geringer Vorerhitzung schon ihre Wärme abgeben, sie erzeugt Säge- und Drehspäne, welche von selbst an der Luft verfaulen, d. i. langsam verbrennen und dadurch sich fast bis zur Selbstentzündung erhitzen, und sie erzeugt endlich Möbel, welche doch offenbar leichter verbrennlich sind als dicke Baumstämme. Schließlich entsteht auch hier wieder Wärme oder Vorbereitung zur Verbrennung, lebendige Kraft und Spannkraft.

Wie hier die Arbeit der Dampfmaschine der Spannkraft des Kohlenstoffs, also im Grunde der lebendigen Kraft der Sonnenstrahlen zu verdanken ist, so rührt fast alle Arbeit auf der Erde von der Sonnenwärme her. Nicht blos das Gedeihen der Pflanzen- und Thierwelt ist von der Sonne abhängig, sondern auch das weite Gebiet der Technik, ja jede Bewegung im gewöhnlichen Leben bis zur menschlichen Thätigkeit hinauf, alles gewinnt seine Kraft aus der Sonne. Die Spannkraft des gehobenen Wassers in den Wolken, den Schneegebirgen, den herabstürzenden und fließenden Wassermassen ist eine Arbeit der Sonnenstrahlen; der Wind, der in den Windmühlen und Segelschiffen Arbeit verrichtet, entsteht durch verschiedene Erwärmung der Luft von Seiten der Sonne; alle Maschinen, welche durch Wärme bewegt werden, von der Gasmaschine bis zur Locomotive, beruhen auf der

Spannkraft des Kohlenstoffs, werden also im Grunde von Sonnenstrahlen umgetrieben; der elektrische Strom, der die Telegraphen und kleine Kraftmaschinen in Bewegung versetzt, entsteht durch Verbrennung des Zinkes, und dies Metall durch die Freiheit des Kohlenstoffs, also wieder durch den Sonnenschein; ebenso wird bei der Darstellung von Eisen und anderen Metallen, sowie von Phosphor aus den Knochen die Kohle verwendet, welche uns durch Sonnenarbeit geliefert wird. Ja selbst unsere eigene Thätigkeit scheint aus verwandelten Sonnenstrahlen zu bestehen; es ist bewiesen, daß der arbeitende Mensch mehr Kohlendioxyd ausscheidet als der müßige, sowie daß der thätige Muskel mehr Sauerstoff verzehrt als der unthätige; es scheint also unsere Kraft wie die Arbeit der Dampfmaschinen auf der Verbindung des Kohlenstoffs, den wir durch die Nahrungsmittel aufnehmen, mit dem Sauerstoff, den wir einathmen, zu beruhen, also auf der Freiheit des Kohlenstoffs vom Sauerstoff, welche von den Sonnenstrahlen herrührt. Man hat hiernach nicht mit Unrecht das ganze Erdenleben als eine Arbeit der Sonne bezeichnet, und den Unterschied zwischen Pflanzen und Thieren dahin festgestellt, daß die Pflanze lebendige Kraft in Spannkraft, das Thier Spannkraft in lebendige Kraft umwandelt.

Die Verwandlung von Wärme in Arbeit und von Arbeit in Wärme ist in der Wissenschaft und deren Geschichte besonders wichtig, weil der älteste Forscher auf diesem Gebiete, Mayer aus Heilbronn, der schon im Jahre 1842 das Princip von der Erhaltung und Einheit der Kraft erkannt hat, auch damals schon eine Folgerung über das Wesen der Wärme und eine Schätzung ihres Arbeitswerthes unternommen hat, aus der seitdem eine neue und fruchtbare Wissenschaft „die mechanische Wärmetheorie“ hervorgegangen ist. Man schätzte nämlich die Wärme nach Wärmemaß, wie ja alles Messen ein Vergleichen mit einer Einheit derselben Art ist; man schätzt sie auch jetzt noch so, da man die lebendige Kraft der schwingenden Moleküle nicht direct messen kann; als Wärme-Einheit oder Calorie (1^c) dient diejenige Wärmemenge, welche 1^{kg} Wasser um 1^0 zu erwärmen vermag. Der Schluß Mayers über die Calorie war folgender: Wenn alle Kräfte im Wesen gleich, nämlich Massenbewegungen sind und bei der Verwandlung ihre Arbeitswerthe nicht ändern, so muß ein bestimmter Betrag der einen Kraft, nach ihrem Maße gemessen, sich immer in einen und denselben Betrag einer anderen Kraft, auch nach ihrem eigenen Maße gemessen, verwandeln, vorausgesetzt, daß bei der Verwandlung keine Arbeit nach außen geht; demnach muß eine Calorie, wenn sie Arbeit leistet, immer dieselbe Zahl von Kilogramm-Metern hervorbringen, und 1^{mk} Arbeit muß in Wärme verwandelt unter allen Umständen dieselbe Zahl von Calorien erzeugen. Diese Folgerung wurde durch zahlreiche, seitdem angestellte Versuche in allen Fällen bestätigt, und damit der entschiedenste Nachweis für die Richtigkeit des Princips geliefert. Wärme mag Arbeit auf die verschiedenste Weise bewirken, immer entsteht durch 1^c eine Arbeit von 424^{mk}; und Arbeit mag Wärme durch Reibung, Stoß, Druck oder wie sonst möglich erzeugen, immer entsteht durch 1^{mk} Arbeit eine Wärme von $^1/_{424}{}^c$. Die Zahl von 424^{mk}, welche man das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit nennt, und die Zahl $^1/_{424}$ Calorie, welche das thermische Aequivalent der Arbeitseinheit darstellt, und mit A bezeichnet wird, sind die Grundzahlen der mechanischen Wärmetheorie; durch dieselbe wurde nicht nur die Anschauung befestigt, daß die Wärme eine Arbeit, eine Massenbewegung, eine Bewegung der Moleküle ist, sondern es wurden auch auf mathematischem Wege vorher unbekannte Erscheinungen und Zahlen für die Wärme aufgefunden, die sich bei angestellten Versuchen als richtig ergaben und dadurch eine werthvolle Bestätigung der Theorie lieferten. Durch ähnliche, auf mathematischem Wege durchgeführte Betrachtungen sucht man immer tiefer in das Wesen der Wärme und anderer Naturkräfte einzudringen; einige Beispiele mögen wenigstens eine Idee von dem dabei beobachteten Verfahren geben.

Wenn wir eine Glasstange reiben, so wird sie heiß und elektrisch; weil sie heiß wird, dehnt sie sich aus und schiebt darum die ringsum liegende Luftmenge etwas fort. Die mechanische Arbeit des reibenden Armes hat sich dabei verwandelt in: 1. Wärme, 2. Elektricität, 3. größeres Volumen der Stange, 4. Fortschieben der Luft. Welche Arbeiten für die Wärme und das Fortschieben der Luft nöthig sind, läßt sich leicht berechnen; könnte man nun die zwei anderen Arbeiten auch noch finden oder durch unbekannte Größen ausdrücken, so müßte nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft die Summe der 4 consumirten Arbeiten gleich der von dem Arme producirten Arbeit sein. Hierdurch entstände eine Gleichung, durch deren Auflösung oder Verbindung mit anderen Gleichungen Schlüsse auf die Werthe der unbekannten Größen und dadurch auf die Eigenschaften der unerklärten Naturkräfte möglich werden könnten. Um die hierbei auftretenden Vorgänge einfach bezeichnen zu können, hat man sie eingetheilt; die Arbeit, welche zur Ueberwindung innerer Widerstände in Anspruch genommen wird, nennt man *innere Arbeit*; eine solche ist in dem betrachteten Beispiel die Vergrößerung des Volumens, da für diese Veränderung die Moleküle eines Körpers weiter von einander entfernt werden müssen und daher ihre An-

ziehung gegen einander überwunden werden muß. Die Arbeit, welche zur Ueberwindung äußerer Widerstände verbraucht wird, heißt äußere Arbeit; eine solche ist in dem betrachteten Beispiele das Fortschieben der Luft, da hierbei der Luftdruck auf einem gewissen Wege überwunden werden muß. Zu der inneren Arbeit gehört wahrscheinlich auch das Erzeugen der Elektricität, da hierbei die zwei sich anziehenden und neutralisirenden Elektricitäten von einander getrennt werden müssen. Die Wärme-Erzeugung wird nicht zur inneren Arbeit gerechnet, sondern als Erhöhung der lebendigen Kraft der Moleküle aufgefaßt, wozu wohl Arbeit nöthig, aber nur die Trägheit, nicht aber eine innere Gegenkraft zu überwinden ist.

In diesem Beispiele wurden sämmtliche Kraftverrichtungen nach Arbeitsmaß gemessen. Es gibt aber auch Fälle, ja nach Clausius sind überhaupt alle Gleichungen fruchtbarer, wenn die Leistungen mit Wärmemaß gemessen, d. h. durch die ihnen gleichwerthige Wärme gemessen werden, indem man einfach den Betrag ihrer Meterkilogramme mit $^1/_{424}$ oder A multiplicirt; dies ist besonders dann zu empfehlen, wenn, wie es sehr häufig geschieht, die Arbeiten durch Wärme vollbracht werden. Wird z. B. ein gewisser Betrag von Calorien in das Wasser eines Dampfkessels geleitet, so wird das Wasser durch einen Theil derselben erwärmt; durch einen anderen Theil wird innere Arbeit geleistet, die Moleküle werden weiter von einander entfernt, das Wasser hierdurch ausgedehnt und in Dampf verwandelt; endlich wird vielleicht eine sehr große äußere Arbeit geleistet, indem der Kolben eines Dampfcylinders von dem Dampf fortgeschoben und hierdurch eine ganze Maschinenfabrik in Thätigkeit versetzt wird. Multipliciren wir diese äußere Arbeit mit A und addiren den so resultirenden Wärmebetrag der äußeren Arbeit zu der für die innere Arbeit und die Erwärmung verbrauchten Wärme, so muß diese Summe, vorausgesetzt, daß kein Wärmeverlust stattfindet, dem zugeführten Betrage von Calorien gleich sein, wodurch wieder eine der erwähnten fruchtbaren Gleichungen entsteht.

Auf diese Weise glaubt man sogar dem Verständnisse des inneren Wesens der Körper einen Schritt näher gekommen zu sein. Da jeder noch so kalte Körper nach aller Erfahrung immer noch kälter werden, also noch Wärme abgeben kann, so muß man annehmen, daß selbst die größte natürliche Kälte von — 70° und die größte künstliche Kälte von — 100°, die man beobachtet hat, immer noch Wärme ist, daß also die Moleküle immer noch in Bewegung sind, noch lebendige Kraft enthalten; und da sie noch in Bewegung sind, so können sie sich auch nicht unmittelbar berühren; es war daher auch Arbeit nöthig, um die sich anziehenden Moleküle in die vorhandene Entfernung von einander zu bringen; folglich enthalten die Moleküle auch Spannkraft, selbst bei jenen niedrigen Temperaturen. Indessen ist doch immerhin der Fall denkbar, daß die Moleküle eines Körpers vollkommen in Ruhe sind und sich unmittelbar berühren; da sie dann keine Spur von Wärme enthalten, so ist man berechtigt, jene nicht vorhandene, aber denkbare Temperatur den absoluten Nullpunkt zu nennen; wir werden später erkennen, daß derselbe 273° unter dem Gefrierpunkte des Wassers liegt. Bei jeder höheren Temperatur aber sind die Moleküle von einander entfernt, sie besitzen eine gewisse durchschnittliche Entfernung von einander, für welche Clausius den Namen Disgregation eingeführt hat; für diese Disgregation war eine gewisse Arbeit oder Wärme nöthig; die Moleküle enthalten demnach Spannkraft oder Energie der Lage; außerdem aber sind die Moleküle auch in Bewegung, wodurch sie die Temperatur des Körpers bilden; sie enthalten also auch Energie der Bewegung oder lebendige Kraft. Da man nun die Summe der lebendigen Kraft und der Spannkraft eines Körpers die Energie des Körpers nennt, so kann man den Satz aussprechen: Jeder Körper enthält unsichtbare Energie. Die Energie eines Körpers kann verändert werden, indem demselben Wärme oder Arbeit zugeführt, oder indem von ihm Wärme oder Arbeit abgegeben wird. Wenn es nun gelingt, die einem Körper zugeführte Wärme oder Arbeit zu zerlegen in einen Betrag, der die Temperatur oder lebendige Kraft oder Energie der Bewegung des Körpers erhöht hat, und in einen zweiten Betrag, der die Disgregation vermehrt, also die Spannkraft oder Energie der Lage erhöht hat, so ist hieraus auch wohl ein Schluß auf die schon vorher in ihm vorhanden gewesene lebendige Kraft und Spannkraft, und demnach auf seine Energie möglich, wodurch man dem Verständnisse seines Wesens näher kommen kann.

---

2. Allgemeine Eigenschaften.

37 Allgemeine Eigenschaften sind solche Eigenschaften, die allen Körpern ohne Ausnahme zukommen. Man unterscheidet sie in wesentliche oder nothwendige und in unwesentliche oder zufällige. Wesentliche Eigenschaften sind solche, ohne welche ein Körper nicht gedacht werden kann. Dieselben folgen aus dem Begriff der Materie, welche wir als das Raumerfüllende definirt haben. Darin liegt zuerst, daß ein Körper einen Raum einnimmt: die Ausdehnung, und sodann, daß der Körper diesen Raum auch ganz in Anspruch nimmt, ohne eine andere Verwendung desselben möglich zu lassen: die Undurchdringlichkeit. Hiermit sind indeß diese beiden Eigenschaften nicht erklärt. — Unwesentliche Eigenschaften sind solche, die wir zwar an allen Körpern finden, aber ohne daß sie zum Bestehen derselben nothwendig sind. Die wichtigsten derselben sind die Trägheit und die Beweglichkeit, d. h. die Eigenschaften, daß ein Körper seinen Raumzustand zwar nicht von selbst, aber durch eine äußere Einwirkung verändern kann. Auch diese Eigenschaften sind unerklärbare Grundeigenthümlichkeiten des Stoffes. Die übrigen unwesentlichen Eigenschaften, die Theilbarkeit, die Porosität, die Ausdehnbarkeit ergeben sich aus der inneren Bildung des Stoffes.

38 **1. Die Ausdehnung. Messen und Meßapparate.** Die Ausdehnung ist die Eigenschaft, daß jeder Körper einen Raum einnimmt. Die Größe des eingenommenen Raumes nennt man den Rauminhalt oder das Volumen des Körpers. Wie und wodurch dasselbe, sowie die Größe der Flächen und Linien gemessen wird, ist in 13 gelehrt worden.

Zur genaueren Messung der Längen dienen die Maßstäbe, welche, wenn sie gerichtliche Geltung oder wissenschaftlichen Werth haben sollen, mit einem Musterstabe verglichen sein müssen. Dazu dient der Comparator. In demselben wirkt der an die Stelle des Musterstabes gelegte Maßstab auf den sehr kurzen einen Arm eines Winkelhebels, so daß bei der geringsten Abweichung das Ende des anderen sehr langen Armes einen bedeutenden Weg auf einer Gradeintheilung zurücklegen muß. Wenn das Metermaß in allen Ländern eingeführt werden soll, so muß für jedes Land ein Musterstab angefertigt und mit dem französischen Urmusterstab des Meters auf das genaueste verglichen werden; dieser Urmusterstab (étalon primitif) befindet sich, einmal von Platin und zweimal von Stahl, in den Kellern der Pariser Sternwarte; zur Vergleichung selbst dient das mètre des archives, ein Musterstab auf dem Längenbüreau. Der Musterstab Deutschlands ist 1,00000301 des mètre des archives, während der étalon primitif 1,00000329 des mètre des archives beträgt. Um die allgemeine Einführung des Metermaßes vorzubereiten, und um für die neue europäische Längen- und Breitengradmessung genaue Maßstäbe zu erwerben, wurde auf den Vorschlag der russischen Akademie und nach mehreren internationalen Conferenzen 1870 von den Regierungen aller civilisirten Staaten eine internationale Commission ernannt, welche die Vergleichung der an die verschiedenen Länder abzugebenden Musterstäbe besorgen sollte. Am 24. Sept. 1872 wurde von dieser Commission in Paris beschlossen, daß die neuen Maß-Prototypen von einem ständigen internationalen Bureau aus einer Legirung von 9 Th. Platin und 1 Th. Iridium aus einem Gusse angefertigt werden sollten; der Querschnitt solle die in Fig. 10 in natürlicher Größe abgebildete Gestalt haben, weil ein Stab von der bisherigen Form einer dicken Platte sich zu leicht biege und dadurch die Abstände der Theilstriche ändere, während diese Form es erlaube, die Theilstriche auf der neutralen Faserfläche des Stabes, der Grundfläche des oberen Kanales, anzubringen; sie sollten Strichmaße sein statt der bisher gebräuchlichen Endmaße, d. h. nicht die beiden Endflächen des Stabes sollten die Enden des Meters sein, sondern 2 Striche auf dem etwa 102^{c} langen Stabe, weil hierbei die Vergleichung mit dem Comparator viel genauer vorgenommen werden könne. Der Comparator für Strichmaße besteht aus einem Wagen, auf welchem die zu vergleichenden Stäbe neben einander liegen, und der bei der Vergleichung unter zwei Mikroskope mit Mikrometern gefahren wird, die in dem zu prüfenden Abstande von einander aufgestellt sind. Nach Wild (1874) vereinigt die von Tresca vorgeschlagene Querschnittsform

Fig. 10.

Fig. 10 mit dem erwähnten Hauptvorzuge noch eine große Rigidität bei kleiner Masse und eine leichte Mittheilung der Temperatur der Umgebung; sie weiche aber gar zu sehr von der gebräuchlichen, leicht handlichen Plattenform ab, und biete wegen der verwickelten Form große Schwierigkeiten in der homogenen Darstellung. Jacobi hat schon früher den Wunsch ausgesprochen, daß eine Substanz gewählt werden möge, die nach ihrer chemischen und molekularen Zusammensetzung, sowie durch ihren Ausdehnungscoëfficienten alle Garantien für ihre Homogenität liefere, und welche auch im Laufe der Zeit ihren Coëfficienten nicht ändere, worin z. B. Zink nach Baeyers Untersuchungen (1869) nicht genügt. Nach all diesen Beziehungen befriedigt am meisten der Bergkrystall, besonders wenn man, wie Neumann vorschlägt, den plattenförmigen Stab auf die Hochkante stellt; hierdurch wird nämlich die Biegung sehr gering, und die auf der Mitte der Breitenfläche angebrachte Skale befindet sich von selbst, ohne die verwickelte Querschnittsform Fig. 10, auf der neutralen Faser.

Die so erhaltenen Meterstäbe müssen nun genau getheilt werden; dies geschieht mittels der Theilmaschine (erfunden von dem Herzog von Chaulnes), welche darauf beruht, daß ein den Schneidestift tragender Schlitten durch die Drehung einer langen Schraubenspindel sehr gleichmäßig fortgeführt wird. Auf der Weltausstellung von 1867 befand sich eine mikrometrische Theilmaschine, mit welcher 1mm in 3000 Theile getheilt werden kann. Oefter benutzt man zu genaueren Messungen größerer Längen den Nonius oder Vernier (nach dem Erfinder). Derselbe ist ein an dem eigentlichen Maßstabe verschiebbarer kleiner Stab, welcher z. B. die Länge von 9 Maßabtheilungen in 10 gleiche Theile getheilt enthält; hierdurch wird jeder seiner Theile um 1/10 der Maßstabtheile kleiner als diese, so daß diese Zehntel noch abgelesen werden können. (Siehe Fig. 11.)

Fig. 11.

Mikroskopisch kleine Gegenstände legt man unter dem Mikroskop auf Mikrometerplatten; Fraunhofer fertigte eine solche an, welche 32000 Theilstriche auf einem Zolle enthielt; die Robert'schen Platten enthalten mehrere Liniensysteme, in welchen sich 400 bis 4000 Linien auf 1mm befinden; Perreaux theilt mit seiner Theilmaschine 1mm in 3000 Theile.

Die Dicke sehr dünner Platten und Drähte mißt man mit dem Sphärometer. Dasselbe besteht aus einer Mikrometerschraube, welche bei einer Umdrehung z. B. um 1mm, bei 1° Umdrehung daher um 1/360mm fortrückt. — Zum Messen und Auffinden größerer Höhenunterschiede an Gebäuden und im Freien bedient man sich der Nivellir-Instrumente. Das einfachste von Bauleuten gebrauchte ist die Setzwage mit Richtscheit, der Pflasterer und Straßenbauer benutzt die Wasserwage, und der Eisenbahnbauer und Geometer das eigentliche Nivellirinstrument, bestehend aus Fernrohr mit Fadenkreuz und einer Libelle. Zum wissenschaftlich genauen Messen kleiner Höhenunterschiede an Apparaten dient das Kathetometer, das aus einem auf einem verticalen Maßstabe verschiebbaren und mit einem Nonius versehenen Fernrohre besteht. Zur Winkelmessung auf dem Papiere und an Gegenständen dienen der Transporteur und das Goniometer; auf dem Felde benutzt man die Boussole (s. 449) und den Meßtisch, einen Zeichentisch mit einem drehbaren Fernrohre, bei dessen Drehung sich ein auf dem Tische liegendes Lineal mitdreht; auf dem Felde und für den Himmelsraum benutzt man den Theodolith, ein Fernrohr, das um die Mittelpunkte eines horizontalen und eines verticalen mit Gradeintheilung versehenen Kreises drehbar ist.

39 **Größte und kleinste Ausdehnung.** Die größte Ausdehnung von den uns bekannten Körpern nehmen die Kometen ein; einige füllen Millionen von Meilen am Himmel aus; doch scheinen sie nicht aus zusammenhängender Körpermasse zu bestehen. Dann folgen die Fixsterne oder Sonnen, von denen unsere Sonne, wahrscheinlich eine der kleineren, einen Durchmesser von 190 000 Meilen hat. Einige Sonnen, z. B. der Sirius, haben nach Bessel fast ebenso große dunkle Begleiter. Die 8 großen Planeten, die größten planetarischen Begleiter unserer Sonne, sind viel kleiner, 600 bis 20 000 Meilen dick; auch die Monde besitzen nur Durchmesser von Hunderten von Meilen, die bis jetzt bekannten 170 Planetoiden 3—60 Meilen. Unser ganzes Sternsystem, von dem Milchstraßenringe umzogen, hat nach Mädler eine Größe von 7700 Jahren Lichtzeit. Merkwürdiger noch erscheinen uns die Körper von kleinster Ausdehnung. Nach Ehrenberg gehen auf 1 c'' 40 000 Millionen von Infusionsthierchen. Solche Thierchen haben einen Magen, auf

dessen Wänden feine Flimmerhaare sich schwingend bewegen und hierdurch den Kreislauf des Nährsaftes erzeugen. Bedenkt man nun noch, daß die Bildung der Haare sehr verwickelt ist, und daß jedes Haartheilchen als organischer Stoff aus vielen Atomen verschiedener Elemente besteht, so erhält man einen ungefähren Begriff von der Kleinheit der Atome und kann sich dann nicht wundern, daß Zuckerwasser und Salzwasser unter dem Mikroskop ganz klar erscheinen. In 1 cmm Blut sind 5 Millionen Blutkörperchen enthalten. Ist in einer Flamme nur $^1/_{3000000}$ Milligramm Natrium enthalten, so kann man dies mit dem Spectroskop noch wahrnehmen.

Gestalt. Die Art der Begrenzung eines stofferfüllten Raumes bildet die Gestalt eines Körpers. Unabhängige Flüssigkeiten und wahrscheinlich auch große Massen von jedem Stoffe nehmen, wie sich später ergeben wird, durch den Einfluß der inneren Kräfte Kugelgestalt an. Kleinere Massen von festem Stoffe haben ebenfalls durch ihre inneren Kräfte bestimmte Gestalten, wenn sie bei ihrer Entstehung in leicht bewegliche Theilchen zerlegt waren und allmälig in den festen Zustand übergingen. Sie bilden dann Individuen, selbständige Gestalten, wie die Pflanzen und Thiere, sind von ebenen Flächen regelmäßig umschlossen, und werden Krystalle genannt. 40

Krystalle entstehen demnach, wenn flüssige Massen langsam in den festen Zustand übergehen, also wenn ein geschmolzener Körper langsam erkaltet, oder wenn das Lösungsmittel eines gelösten Stoffes langsam verdampft oder anderweitig beschäftigt wird, oder wenn eine heiße gesättigte Lösung eines in der Kälte weniger löslichen Stoffes sich langsam abkühlt u. s. w. Es finden sich daher natürliche Krystalle vorwiegend in Höhlen und Mandelräumen, oft auch in Trümmergestein und in Schwemmland. Auch in den Zellen, den Elementargebilden der Pflanzen- und Thierwelt, auf Schmetterlingsflügeln u. dgl. finden sich krystallähnliche Gestalten. Die Chemie und die chemische Technik erhalten ihre Producte meist aus Lösungen, daher auch meist in Krystallen. Solche Stoffe, welche unlöslich sind, aber durch Zusammenbringen von Lösungen als sogenannte Niederschläge entstehen, erscheinen nur selten als Krystalle, und dann in mikroskopisch kleinen Gestalten, wie z. B. Kaliumplatinchlorid. Die meisten Niederschläge sind amorph. In neuester Zeit (1866) hat Fremy solche dadurch krystallisirt erhalten, daß er die Fällung künstlich verzögerte. Es wurden z. B. die zusammenzubringenden Lösungen mit Gummi, Zucker, Gelatine vermischt und dann durch eine poröse Scheidewand in Verbindung gesetzt, an welcher sich nun sehr langsam schöne Krystalle von z. B. schwefelsaurem Barium, das sonst als Pulver zu Boden fällt, ansetzten. Hieraus folgt, daß auch in der Natur diese Krystalle durch solche lang andauernden Vorgänge, also aus sehr verdünnten Lösungen entstanden sein können, was für die neueren geologischen Anschauungen spricht. Jedoch hat Scheerer (1873) auch Krystalle von Schwerspath und Flußspath erzeugt, indem er schwefelsaures Barium und Fluorcalcium in Wasser von 300°, also unter einem Drucke von mehr als 30 Atmosphären löste, was für die älteren geologischen Anschauungen spricht. In manchen Fällen bilden sich durch Sublimation Krystalle, wie z. B. aus Joddampf.

Gehen die angeführten Krystallisationsprocesse nicht langsam vor sich, so bilden sich zahllose kleine Krystalle, Krystallkeime, die sich gegenseitig in der Ausbildung hemmen; es entsteht das krystallinische Gefüge. Die meisten Urgebirge wie z. B. Urkalk, die plutonischen Gebirge wie Porphyr, und die vulkanischen Gebirge wie z. B. Basalt, sind krystallinisch. Man folgerte auch hieraus die Entstehung derselben aus geschmolzener Masse. Neuere Geologen behaupten indeß, der krystallinische Zustand könne durch die unendlich vielen zitternden Bewegungen, welche die Erde immer aufnimmt (s. 36) entstanden sein und noch immer entstehen, wie zähes, faseriges Schmiedeeisen sich durch Erschütterungen in sprödes, körniges Eisen umwandele; oder es könnten sich die Massen der genannten Gebirge an der Stelle anderer allmälig durch Sickerwasser gelösten Massen ebenso allmälig aus diesem Wasser abgesetzt oder chemisch ausgeschieden haben und dadurch krystallinisch geworden sein.

Wenn die erwähnten Erstarrungsprocesse zu rasch vor sich gehen, so können auch keine Krystallanfänge gebildet werden: die entstehende Masse ist amorph. Eine geschmolzene Masse behält dann das Gepräge der Schmelzung bei, wird also glasig amorph; die gelöste Masse fällt in ihren einzelnen Theilchen nieder, wird erdig amorph. Solche Massen entstehen auch, wenn krystallinische Stoffe zertrümmert werden. Da nun die Uebergangs- und die Tertiär-Gebirge meist aus zertrümmerten und weggeschwämmten Massen bestehen, wie der Bodengrund, so sind dieselben erdig amorph. — Ist eine Flüssigkeit von gallertiger Beschaffenheit, wie Leimlösung, Kieselsäure, Aluminiumhydroxyd, erhitzte Gummi-Arten, geschmolzene Glasmasse, gluthweiche Metalle, so haben die Theilchen keine leichte Beweglichkeit; es können sich daher beim Festwerden keine Krystalle bilden, selbst dann nicht,

wenn Verdunstung oder Abkühlung langsam geschehen. Graham nennt die hierher gehörigen Stoffe Kolloide (κόλλα = Leim und εἶδος = Form) und im Gegensatze hierzu diejenigen Stoffe, welche krystallfähige Flüssigkeiten bilden, Krystalloide. Die Kolloide behalten auch, wenn sie fest geworden sind, meist den gallertigen Anschein, wie Opal, fester Leim, Gummi-Arten, Glas u. s. w. und haben auch dann in ihren inneren Eigenschaften manche Aehnlichkeit mit Flüssigkeiten.

Manche Stoffe, z. B. Schwefel, können bei verschiedener Methode der Krystallisation verschiedene Gestalten annehmen; man nennt sie dimorph, allgemeiner polymorph. Im Gegensatze dazu gibt es Körper von verschiedenem Stoffe, die gleiche Krystallform annehmen, wie z. B. die verschiedenen Alaune; solche Körper nennt man isomorph. Sie zeigen übrigens doch eine große Analogie in ihrer chemischen Zusammensetzung, bestehen aus ähnlichen Verbindungen sehr ähnlicher Stoffe; außerdem hat man kleine Abweichungen in den Winkeln wahrgenommen. Hieraus, sowie aus der ganzen Krystallographie erhellt das Gesetz, daß jedem unorganischen Stoffe eine bestimmte Krystallgestalt ebenso eigenthümlich ist, wie jedem Pflanzen- und Thierkörper eine individualisirte Gestalt zugehört.

Doch hat man erst in der neuesten Zeit (Albrecht Schrauf in Wien 1867) angefangen, die Krystallform der Stoffe aus ihrer chemischen Constitution abzuleiten, weiß also doch wenigstens, daß von dieser die Gestalt abhängt und herrührt. Wodurch und wie aber die Gestalten der organischen Körper, der Pflanzen und Thiere, entstehen, ist ganz und gar unbekannt. Da überdies die Embryone der Pflanzensamen ebenso mit einander übereinstimmen, wie die Eier der Thiere, so ist es nicht einmal ausreichend, in den Samen und Eiern eine Lebenskraft anzunehmen, sondern es muß sogar einstweilen noch in jedem Samen und in jedem Ei eine individuelle Kraft vorausgesetzt werden, um die verschieden gestalteten und verschieden gearteten Producte jener gleichen Anfänge begreiflich zu finden. Dem gegenüber hat Darwin in der neueren Zeit den Satz zu begründen gesucht, daß äußere Verhältnisse, sogenannte natürliche Zucht, Formänderungen hervorbringen könnten, woraus wieder Andere geschlossen haben, daß alle Formen durch allmälige Umänderungen der einfachsten Urformen mittels der natürlichen Zucht entstanden seien. Ob es auf diesem Wege je gelingen wird, die Entstehung der Pflanzen- und Thierformen zu erklären, muß um so mehr dahin gestellt bleiben, als man ja noch nicht einmal die Gesetze dieser Gestalten kennt, ausgenommen etwa die Goethe'sche Metamorphose und das Schimper'sche Gesetz der Blattstellung, und als es noch nicht gelungen ist, die Entstehung der Zelle, des Grundgebildes aller Pflanzen- und Thierkörper, durch physikalische und chemische Kräfte zu erklären. Nur das ist allbekannt, daß die meisten Thierkörper seitlich symmetrisch d. h. aus zwei gleichen, aber nicht congruenten Hälften, gestaltet sind, daß manche Thiere, wie die Strahlthiere, noch größere Regelmäßigkeit, ähnlich der Blattstellung der Pflanzen, zeigen, und daß bei höheren Thieren, wie beim Menschen die Theilung der ganzen Gestalten und der einzelnen Glieder hauptsächlich das Gesetz des goldenen Schnittes zu befolgen scheint. In letzter Zeit ist dem Physiologen Traube die Erzeugung künstlicher Zellen und das Wachsthum derselben durch Intussusception gelungen.

41 **2. Die Undurchdringlichkeit** ist die Eigenschaft, daß ein Körper sich nicht gleichzeitig mit einem anderen in demselben Raume befinden kann. Soll also ein Körper den Raum eines anderen einnehmen, so muß er denselben zuerst von seiner Stelle verdrängen. Schon der Tastsinn gibt uns von dieser Eigenschaft Kunde; wir erfahren einen Widerstand, wenn wir uns an die Stelle eines anderen Körpers setzen wollen; dieser auf unseren Tastsinn ausgeübte Widerstand ist sogar der einzig untrügliche Beweis für das materielle Dasein der Körper, da alle anderen Sinne der Täuschung ausgesetzt sind. Dieser Widerstand wächst mit der zu beseitigenden Masse. Beim Gehen in ruhiger Luft spüren wir denselben gar nicht; fühlbarer wird er schon, wenn wir heftigem Winde entgegen gehen, oder wenn wir durch Wasser gehen; der größte Theil der Kraft der Dampfschiffe und auch ein großer Theil der Kraft einer Locomotive wird dazu verwendet, Wasser, resp. Luft zu beseitigen, um deren Stelle einzunehmen.

Noch viele Erscheinungen beweisen uns die Undurchdringlichkeit. Werfen wir einen Körper in ein Wassergefäß, so steigt das Wasser um das Volumen des Körpers; man benutzt dies, um mittels graduirter Wassergefäße das Volumen unregelmäßiger Körper zu finden. Wenn beim Lösen eines festen Körpers oder beim Vermischen von Flüssigkeiten oder beim Verschlucken von Gasen durch feste Körper oder Flüssigkeiten der betreffende Raum sich nicht oder nur wenig vergrößert, so beruht dies nicht auf einer etwaigen Durchdringlichkeit der Körper, sondern darauf, daß die Moleküle des einen Stoffes sich in die

molekularen Zwischenräume des anderen Stoffes lagern. — Auch die Luft ist undurchdringlich, wenn wir auch leicht in dieselbe eindringen können; ein luftdicht schließender Kolben läßt sich nie bis auf den Boden des Cylinders drücken; dies beweist, daß die Luft, wenn auch zusammendrückbar, doch undurchdringlich ist. Legt man ein mit einem brennenden Kerzchen versehenes Korkstück auf Wasser und stülpt ein großes Glas darüber, so sieht man das Kerzchen noch brennen, wenn auch das Glas tief unter das Wasser gedrückt ist. Zwar wird die Luft durch den Wasserdruck zusammengepreßt und daher das Kerzchen in dem Glase etwas gehoben; allein die Luft wird nie vom Wasser verdrängt. Darauf beruht die Taucherglocke. Früher hatte dieselbe die Form einer Glocke; später wurde sie nach Smeaton in Form länglich vierseitiger Kasten von Gußeisen, mit Bänken im Inneren für die Arbeiter und ihre Werkzeuge angefertigt; in die obere Seite mündete ein Schlauch, durch welchen eine Compressionspumpe frische Luft in die Glocke preßte, während die innere halbverdorbene Luft am unteren Rande in Blasen entwich. In neuester Zeit verwendet man statt der Taucherglocken Kautschuk-Kleidungen, Skaphander genannt, welche den ganzen Körper wasserdicht umhüllen, vor den Augen starke Glasfenster und vor dem Munde ein Kautschukrohr zum Athmen tragen. — Durch einen engen und eng anschließenden Trichter läuft die Flüssigkeit gar nicht, weil die Luft der Flüssigkeit nicht Platz machen kann. Gußformen müssen Luftlöcher haben, damit die Luft entweichen kann. Durch eine enge Oeffnung am Boden eines Gefäßes fließt eine Flüssigkeit sehr langsam oder gar nicht aus, weil in dieser Oeffnung aufsteigende Luft und abfließende Flüssigkeit nicht gleichzeitig vorhanden sein können. — Läßt man nach der herrschenden atomistischen Ansicht den Stoff aus räumlichen Atomen von einiger, wenn auch noch so unbedeutender Größe bestehen, so schreibt man denselben hiermit auch Ausdehnung und Undurchdringlichkeit zu, erklärt also diese beiden Eigenschaften nicht. Indessen gibt es auch Forscher, welche die Atome als bloße Stoffpunkte ohne Größe und Gestalt, als stofflose Sitzpunkte der materiellen Kräfte ansehen. Thut man dies, so kann man jene beiden Eigenschaften auf folgende Weise erklären: Will man ein Atom aus seiner Verbindung mit den übrigen Atomen herausreißen, so widersteht dem die Anziehung der übrigen Atome; will man es in dieselbe hineindrücken, so widersteht die lebendige Kraft der Atome oder die Abstoßung der Aetheratome. Dies erklärt die Undurchdringlichkeit. Da nun dieselbe an dem ganzen Umfange eines mit Atomen erfüllten Raumes stattfinden muß, so ist hiermit auch die Ausdehnung erklärt.

3. Die Theilbarkeit ist die Eigenschaft, daß jeder Körper sich durch mechanische Verrichtungen, wie Schlagen, Stoßen u. s. w. in kleinere Körper zerlegen läßt. Die Theilbarkeit ist uns ein Beweis von der inneren Getheiltheit des Stoffes; denn wäre derselbe, wie die Dynamisten und viele Philosophen annehmen, innerlich ungetheilt, ununterbrochen, ein Continuum, so würde ein Körper durch Auseinanderziehen zwar immer dünner und dünner, bis ins Unendliche feiner und lichter, nie aber zerrissen werden können. Nach der atomistischen Ansicht erklärt sich dagegen die Theilbarkeit einfach dadurch, daß die theilende Kraft größer sein kann als die Anziehung der Theilchen gegen einander. 42

Die kleinsten Theilchen, welche künstlich erhalten werden können, werden Massentheilchen oder Partikeln genannt. In den meisten Fällen müssen dieselben noch aus vielen Molekülen oder Atomen bestehen, besonders dann, wenn bei weitgehenden künstlichen Theilungen der Zusammenhang noch nicht aufgehoben ist, wie z. B. in folgenden Fällen: Mit einem Dukaten kann man Roß und Reiter vergolden. — Die Lyoner Goldtressen haben eine Vergoldung von $^1/_{100000}$ mm Dicke; man fertigt sie an, indem man einen vergoldeten Silberstab von 3cm Dicke und 20cm Länge zu einem Drahte von 100 Meilen Länge auszieht; der Goldüberzug dieses Drahtes erscheint selbst unter dem Mikroskop noch zusammenhängend. — Der Wollaston'sche Platindraht ist $^1/_{10000}$ cm dick und wird nur durch Glühen sichtbar; er wurde angefertigt, indem man einen silberumgossenen Platindraht höchst fein auszog und dann das Silber durch Salpetersäure entfernte. — Auch die Nobert'schen Platten, das Fraunhofer'sche Mikrometer und das Millimeter-Glas von Perreaux sind Beispiele weitgehender künstlicher Theilung. Noch weiter geht offenbar die natürliche Theilung, wie bei der Lösung (1 Theil Fuchsin färbt 1 Million Theile Wasser noch deutlich roth), der Ausbreitung von Riechstoffen (Moschus in einem Dom, Rosmarin am Mittelmeer), der Diffusion der Luftarten. Diese Theilung ist wahrscheinlich eine Zerlegung bis in die Moleküle.

4. Die Porosität ist die Eigenschaft, daß die Körper Lücken haben, welche mit anderem, als dem Körperstoffe, gewöhnlich mit Luft oder Wasser erfüllt sind. So wie man an Schwamm und Brod, im Inneren von Binsen oder Palmenholz 43

mit blosem Auge größere und kleinere Lücken wahrnimmt, so finden sich noch viel zahlreichere, aber sehr kleine und unsichtbare Lücken in jedem festen Körper; und diese Lücken nennt man Poren. Wo man dieselben nicht mit dem Mikroskop wahrnehmen kann, lassen sie sich durch Versuche nachweisen. Macht man ein sehr dichtes Holz, das scheinbar keine Poren hat, zum Boden einer hohen Röhre und füllt diese mit Quecksilber, oder pumpt man unter einem Quecksilber enthaltenden Gefäße aus solchem Holze die Luft weg, so regnet das Quecksilber durch das Holz, wodurch die Porosität desselben offenbar wird. Manche Körper zeigen sich dadurch porös, daß sie, in Flüssigkeit gelegt, Luft entwickeln, wie Kalk, oder durchscheinend werden, wie Hydrophan, Nephelin u. s. w. Die Porosität von Steinen wird besonders durch die schönen Pettenkofer'schen Versuche (1861) deutlich. Werden auf zwei gegenüberliegenden Stellen einer dicken Sandsteinplatte oder Backsteinmauer Röhren hermetisch aufgesetzt und alle übrigen Stellen luftdicht mit Gyps und Harz bekleidet, so kann man mit der einen Röhre Luft in die andere blasen, als ob kein Stein vorhanden wäre, z. B. ein Licht ausblasen oder Leuchtgas durch die Mauer leiten, so daß auf der anderen Seite eine meterlange Flamme entsteht. — Die Porosität der Metalle beweist man durch den Versuch der Florentinischen Akademie (1661). Dieselbe füllte eine hohle Goldkugel mit Wasser und gab derselben dann durch eine starke Pressung eine Formänderung. Da nun, wie die Mathematik beweist, von allen Körpern mit gleich großer Oberfläche die Kugel den größten Inhalt hat, so muß bei einer Formänderung der Inhalt kleiner werden; wirklich bedeckte sich bei diesem Versuche und den häufigen Wiederholungen desselben die Kugel mit Schweiß.

Die Entstehung der Poren erklärt sich dadurch, daß die Körper nicht aus Haufwerken von regelmäßig eng zusammen gelagerten Molekülen bestehen, sondern daß die Moleküle meistens erst zu gewissen Elementargebilden zusammentreten. In der organischen Welt bilden sich Zellen und Fasern und in der Steinwelt Krystallkeime. Wenn sich diese Elementargebilde an einander legen, so müssen zwischen denselben Lücken bleiben, welche die Poren bilden. Da jene Elementargebilde immer noch kleiner sind als die kleinsten Pulverkörnchen, so müssen künstlich aus gepulvertem Stoffe zusammengepreßte Körper, wie künstlicher Graphit, Thongefäße u. dgl., sowie die aus Wasser abgesetzten Boden- und Steinschichten, die größten Poren besitzen; nach diesen Körpern werden hinsichtlich der Größe der Poren wohl erst die organischen Stoffe und die krystallinischen und krystallisirten unorganischen Körper folgen. Die Flüssigkeiten und Luftarten haben leicht bewegliche Massentheilchen, welche in jede Lücke hineinrollen müssen, können daher Poren im gewöhnlichen Sinne nicht besitzen; sie haben aber große Molekularzwischenräume, so daß Flüssigkeiten sich innig mit einander vermischen und Luftarten einsaugen können, und daß die Luftarten sich leicht gegenseitig durchdringen, sich in einander ausbreiten oder diffundiren können. Demnach verhalten sich Luftarten und Flüssigkeiten sehr porös, ohne Poren im gewöhnlichen Sinne zu besitzen. Diejenigen festen Körper aber, welche aus gallertigen Flüssigkeiten entstanden sind, die Kolloide, haben wegen ihrer Entstehung keine Elementargebilde und daher auch keine größeren Lücken, keine eigentlichen Poren; auch ihre Molekularzwischenräume können, da sie feste Körper sind, nur klein sein. Demnach müssen die Kolloide, wie Glas, Gummi-Arten, gehämmerte schweißbare Metalle die geringste Porosität haben. Wenn diese Stoffe dagegen erwärmt und dadurch weich werden, so sind ihre Theilchen leichter beweglich; daher können Gase, welche stark diffundiren, wie Wasserstoff, oder welche eine Art chemischer Anziehung von den Kolloiden erleiden, in großer Menge in dieselben eindringen, und zwar in so großer Menge, daß diese Gase nach Grahams Untersuchungen (1866) wahrscheinlich sogar flüssige oder feste Form annehmen und bei der Abkühlung von den festen Körpern eingeschlossen und durch Anziehung festgehalten werden. So schließt geschmiedetes Platin bei der Rothgluth sein 4 faches Volumen Wasserstoff ein, geschmolzenes viel weniger, geschmiedetes Palladium gar sein 600 faches Volumen Wasserstoff, Eisen sein 4 faches Volumen Kohlenoxyd, Silber viel Sauerstoff. Bei geringerer Temperatur ist die Menge der absorbirten Gase viel kleiner. Krystallinische Metalle wie Antimon schließen gar kein Gas ein, weil die Poren derselben so groß und zahlreich sind, daß das eingedrungene Gas durch Reflexion sofort wieder entweicht. Graham unterscheidet hiernach drei Arten von Poren: 1. Poren, welche in Wänden offene Kanäle bilden, so daß Gase einfach, vermöge

ihres Ausbreitungsbestrebens durch dieselben gehen, wie die Poren von künstlichem Graphit. 2. Poren, welche von Gasen nur mit Hilfe eines äußeren Druckes oder der Anziehung der Porenumgebung durchdrungen werden, wie die Poren von Holz und Stein. 3. Poren, welche vermöge einer Art chemischer Anziehung des Körperstoffs Gase einschließen, so daß diese flüssig werden. Sie finden sich in Kolloiden, verarbeiteten Metallen und Flüssigkeiten und sind wahrscheinlich nur die Molekularzwischenräume dieser Körper. Vergleicht man das Gewebe der Moleküle etwa mit einem Fischernetze, so sind die letzteren Poren mit den Maschen desselben, die ersten zwei Arten mit größeren oder kleineren in das Netz gerissenen Löchern vergleichbar.

5. Die Trägheit (Galilei 1638) ist die Eigenschaft, daß ein Körper seinen Zustand nicht von selbst ändern kann. Es gilt dies zwar für alle nur denkbaren Zustände; da jedoch alle Zustandsänderungen Bewegungsänderungen sind, so ist kein Zustand ausgeschlossen, wenn wir den Begriff der Trägheit beschränken auf das unthätige Verharren des Stoffes im Zustande der Ruhe oder im Zustande der Bewegung. Ist ein Körper in Ruhe, so bleibt er so lange in Ruhe, bis eine Kraft auf ihn einwirkt. Ist er in Bewegung, so kann an diesem Bewegungszustande nur durch eine Kraft etwas geändert werden: der Körper muß daher, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt, mit unveränderter Geschwindigkeit in gerader Linie ins Unendliche gehen. Man nennt diese zwei Sätze zusammen auch das Gesetz der Trägheit. Wir haben dasselbe schon (in 15.) unter dem Namen des ersten Newton'schen Gesetzes der Mechanik kennen gelernt, müssen jedoch hier seine Consequenzen weiter ausführen. 44

Für den Zustand der Ruhe ist das Gesetz der Trägheit sofort einleuchtend; denn wir erfahren oft genug, daß ein ruhender Körper zur Fortbewegung einer Kraft bedarf. Besonders auffallend wird dies, wenn eine Kraft nur auf einen Theil eines Körpers oder einer Körperverbindung wirkt; alsdann wird dieser Theil in Bewegung versetzt, der andere Theil aber nicht, weil sich die Wirkung einer Kraft nicht momentan auf alle Theile fortpflanzt, sondern einer gewissen, wenn auch noch so kleinen Zeit bedarf, um von Theilchen zu Theilchen fortzuschreiten. Wenn wir z. B. in einem ruhenden, aber dann plötzlich abfahrenden Kahne oder Wagen nach vorwärts sitzen, so fährt unser Oberkörper scheinbar zurück, d. h. er bleibt noch in Ruhe zurück, während der Unterkörper sich voran bewegt. — Wenn auf einem Kartenblatte direct über der Mündung einer Flasche eine Münze liegt und das Blatt weggeschnellt wird, so fällt die Münze in die Flasche, weil die Bewegung der Karte so rasch vor sich geht, daß sie sich der Münze nicht mittheilen kann. Aehnliche Erscheinungen sind: das Abschlagen von Mohnköpfen mit einem Stocke und das Ausfließen von Wasser aus einer schnell seitwärts gezogenen Schüssel. — Schießt man eine Kugel durch eine Fensterscheibe, so entsteht ein Loch, ohne daß die Scheibe zersplittert, was bei einem weniger heftigen Schlage geschieht. Ebenso kann man durch ein Brett, das nur leicht in lockeren Boden gestellt ist und durch einen Fingerstoß umgeworfen werden kann, eine Kugel schießen, ohne es umzuwerfen. Eine Thonpfeife, die auf zwei wagrecht gespannten Haaren ruht, kann durch einen kräftigen Hieb entzweigeschlagen werden, ohne daß die Haare zerreißen. — Ein Faden, der bei ruhigem Heben ein schweres Gewicht zu tragen vermöchte, reißt ab, wenn man mit einem Ruck heben will. — Explosive Stoffe, die zu schnell explodiren, wie Knallsilber, Jodstickstoff, Schießwolle u. s. w. sind nicht zum Schießen brauchbar, weil nicht Zeit genug zur Uebertragung der Bewegung auf die Kugel vorhanden ist und daher die Geschütze zerspringen. Ebenso reißen die Zugstränge eines Wagens, wenn die Pferde beim Abfahren zu rasch und ruckweise ziehen. — Daraus folgt, daß jede wirklich momentane Kraft, d. i. eine solche, die nur in einem Zeitpunkte wirken würde, bei ziehender Wirkung nur das erste Atom des gezogenen Körpers abreißen und bei drückender Wirkung das erste und dadurch auch die folgenden Atome in eine blos schwingende Bewegung versetzen könnte. Eine momentane Kraft nach dem gewöhnlichen Sinne aber, wie etwa der Stoß, dessen Wirkung noch immer eine, wenn auch noch so geringe Zeitdauer hat, wird zwar ebenfalls zitternde Bewegungen, aber auch eine fortschreitende hervorrufen, weil das erste gestoßene Atom wegen der Fortdauer des Stoßes nicht zurückkehren kann, sondern seine Bewegung den folgenden mittheilen muß. Diese fortschreitende Bewegung kann sich aber nur auf die nächsten Massen fortpflanzen, weil sie durch die entstehenden, unvermeidlichen Schwingungen bald aufgezehrt wird. Darauf beruht die so wichtige Wirkung des Stoßes. Alles Schlagen, Stechen, Hämmern, Klopfen, Reißen, Feilen, Hobeln, das Einrammen der Pfähle u. s. w. wirkt nur dadurch, daß eine große lebendige Kraft sich nicht in einem Augenblicke auf alle nahe und ferne liegenden Massen übertragen kann.

könnte z. B. die Kraft eines Rammklotzes sich im Momente der Berührung auf die ganze Erde fortpflanzen, so würde der Pfahl um kein Haar breit weichen; da die Bewegung sich aber nur auf diesen und den nächsten Bodengrund zu übertragen vermag, so erfolgt das Einsinken. Alle derartigen Stoßwirkungen sind indeß nur möglich, wenn die Kraft stark genug ist, um die Hindernisse der Bewegung, also in dem letzten Beispiele die Festigkeit des Bodens zu überwinden. Wenn dies nicht der Fall ist, so erzeugt die Kraft keine fortgehende Bewegung der ganzen Masse, sondern nur eine zitternde Bewegung der kleinsten Theilchen. Ganz dasselbe gilt auch für eine dauernde Kraft, wenn der Betrag derselben geringer ist, als der Gesammtbetrag der Hindernisse. Kann sie aber diese Hindernisse überwinden, so reicht der geringste Kraftüberschuß aus, die Masse in Bewegung zu versetzen, ebenso wie eine noch so große, aber absolut freie Masse durch die allergeringste, aber dauernd wirkende Kraft bewegt werden könnte. Jedoch würde in diesem Falle auch die anfängliche Geschwindigkeit unmerklich sein und erst nach längerer Zeit könnte sich einige Geschwindigkeit ansammeln. Diese allmälige Zunahme der Geschwindigkeit findet übrigens auch bei größeren Kräften statt; denn für jede auch noch so große Kraft, welche Massen bewegt, wie z. B. die Dampfkraft eines Zuges, die Wasserkraft einer Spinnerei, läßt sich ein hinreichend kleines Zeittheilchen denken, in welchem der Betrag der Kraft denjenigen der Hindernisse nur um sehr wenig überragt, also auch nur eine geringe Geschwindigkeit erzeugt. Diese kann nun, wenn jene die Hindernisse überwiegende Kraft fortwirkt oder gar noch wächst, rasch sehr groß werden; denn nach dem Gesetze der Trägheit behält die Masse ihre schon errungene Geschwindigkeit bei und empfängt in jedem Augenblicke neue Geschwindigkeit hinzu. Doch ist ein schädliches Uebermaß meist unmöglich; denn die Hindernisse wachsen gewöhnlich, wenn die Geschwindigkeit wächst und erreichen endlich eine solche Höhe, daß ihr Betrag dem der Kraft gleich ist. Je schneller sich z. B. ein Dampfschiff bewegt, desto größer ist die zu verdrängende Wassermasse, die Reibung und der Widerstand der Luft; sind diese Widerstände zusammen so groß geworden wie die Kraft der Maschine, so kann die Geschwindigkeit nicht mehr wachsen; sie nimmt aber auch nicht ab; denn die ganze Masse läuft nach dem Gesetze der Trägheit fort; der sogenannte *Anlauf* der Maschine ist zu Ende, ihr *Beharrungszustand* ist eingetreten. Soll der *Endlauf* eintreten, so wird die Wirkung der Kraft, z. B. das Einströmen des Dampfes aufgehoben; es zehren dann die Widerstände allmälig die angesammelte lebendige Kraft auf, bis die Geschwindigkeit = Null ist und die Masse stillsteht.

45 Auch für den Zustand der Bewegung das Gesetz der Trägheit zu beobachten, bietet das gewöhnliche Leben Gelegenheit genug. Wenn man in einem plötzlich anhaltenden Kahne oder Wagen nach vorwärts sitzt, so fährt man mit dem Oberkörper voran. — Wollte man aus dem rasch fahrenden Zuge springen, so würde man beim Austreten mit zerschmetternder Heftigkeit in der Richtung des Zuges zu Boden geschleudert werden. — Um Flüssigkeit von einem festen Körper ab- oder auszuspritzen, bewegen wir denselben rasch vorwärts und halten dann plötzlich an. — Auf einem schnell fahrenden Dampfschiffe kann man Ball spielen wie auf dem Lande; denn der Ball behält während des Steigens und Fallens die Bewegung des Schiffes bei; ein Zuschauer am Ufer könnte leicht beobachten, daß der Ball wirklich schief auf- und abwärts geht, während er dem Spieler senkrecht auf und ab zu gehen scheint. — Ebenso fällt ein Stein, den man aus einem Eisenbahnwagen fallen läßt, scheinbar senkrecht zu Boden, beschreibt aber für einen außen stehenden Zuschauer eine schief vorwärts gehende Linie. — Wir machen von der Trägheit in diesem Sinne häufig Anwendung; wir bringen z. B. den Stiel fester in einen Hammer, indem wir ersteren rasch aufstoßen; der Stiel kommt dann plötzlich zur Ruhe, der Hammer aber fährt noch an demselben hernieder. Beim Werfen, Schleudern, Schießen u. s. w. geben wir einem Körper eine gewisse Geschwindigkeit und überlassen ihn dann seiner Trägheit; er geht dann in der Richtung und mit der Geschwindigkeit, die er beim Loslassen hat, weiter. Von der Richtung wird er durch die Anziehung der Erde abgelenkt, seine lebendige Kraft wird durch die ihm entgegentretenden Widerstände aufgezehrt; sonst würde er mit unveränderter Geschwindigkeit in gerader Linie ins Unendliche gehen. Dieser Folgerung widerstrebt anfangs das Gefühl, weil die Erfahrung kein Beispiel dafür zeigt. Vergleicht man aber in Gedanken die Bewegung eines eckigen Körpers, der

auf einer lockeren Sandbahn vorangeworfen wird, mit der Bewegung einer glatten Elfenbein- oder Pockholzkugel, die auf einer festgestampften Kegelbahn voranrollt, oder gar mit der Bewegung einer geschliffenen Stahlkugel auf einer diamantenen Bahn, so wird das Widerstreben des Gefühls schwinden. Man wird dann auch zugeben, daß eine Maschine im Beharrungszustande vermöge ihrer Trägheit fortläuft, und daß die Kraft blos die Widerstände zu überwinden hat, sowie daß die Weltkörper, denen keine Widerstände begegnen, einmal bewegt, ohne Ende in gleicher Weise sich fortbewegen müssen.

Wenn das Gesetz der Trägheit für die Bewegung nicht bestände, so müßte ein Vogel, der von seinem Neste fliegt, in wenigen Augenblicken viele Meilen von demselben entfernt sein, da die Erde sowohl auf ihrer Bahn um sich selbst, als auch um die Sonne unter dem Vogel fortrollen müßte; ein starker Sprung würde für eine Reise hinreichend sein. Als man zuerst die Drehung und die Fortbewegung der Erde näher ins Auge faßte, stellten Gegner dieser Bewegungen, welche das Gesetz der Trägheit noch nicht kannten, ähnliche Einwendungen auf; selbst bedeutende Astronomen, wie Tycho de Brahe und Riccioli meinten, wenn die Erde sich wirklich nach Osten drehe und fortbewege, so müsse ein von einem Thurme herabfallender Stein westwärts vom Fuße des Thurmes auf dem Boden anlangen. Als nun aber Galilei 1638 den Begriff der Trägheit aufgestellt und jenen Einwurf dadurch beseitigt hatte, machte Newton aus demselben sogar einen Beweis für die Umdrehung der Erde. Da nämlich die Spitze eines Thurmes weiter vom Mittelpunkte der Erde entfernt ist als der Fuß desselben, so muß, wenn die Erde sich wirklich dreht, die Spitze auch eine größere Geschwindigkeit nach Osten haben als der Fuß; ein von der Thurmspitze herabfallender Stein muß nun nach dem Gesetze der Trägheit diese größere östliche Geschwindigkeit während des Fallens beibehalten und daher etwas östlich vom Fuße des Thurmes zu Boden fallen. Aus dem Halbmesser der Erde und der Höhe des Thurmes läßt sich der Unterschied berechnen; die Versuche Benzenbergs (1802) am Michaelis-Thurme zu Hamburg haben jene Folgerung sowohl der Art als der Größe nach bestätigt und demnach die Wahrheit der Voraussetzung, nämlich die Drehung der Erde bewiesen.

Wenn ein ruhender Körper sich ohne die Einwirkung einer Kraft nicht bewegen kann, so ist damit auch ausgesprochen, daß durch eine solche Einwirkung jeder Körper bewegt werden, also Arbeit oder lebendige Kraft in sich aufnehmen kann. Diese Möglichkeit, daß ein Körper durch eine Kraft bewegt werden kann, nennt man die Bewegbarkeit, eine allgemeine Eigenschaft, welche in dem Begriff der Trägheit schon enthalten ist. Es wurde schon dargethan, daß die bewegende Kraft direct der zu bewegenden Masse und der zu erzielenden Geschwindigkeit und indirect der hierzu nöthigen Zeit proportional ist. Bei dem Princip von der Erhaltung der Kraft, wonach sich eine Kraft unverändert von Masse zu Masse überträgt, ist natürlich vorausgesetzt, daß eine und dieselbe Masse ihre lebendige Kraft unverändert beibehält, wenn sie sich selbst überlassen bleibt; es ist also dort die Eigenschaft der Trägheit stillschweigend vorausgesetzt.

46 **Die Centrifugalkraft** (Huyghens 1660). Wenn ein Körper sich in gerader Linie bewegt, so ist die Kraft, mit welcher er in dieser Linie fortgeht, gleich seiner lebendigen Kraft. Wenn ein Körper gezwungen ist, sich in krummer Linie zu bewegen, so ist das Bestreben, nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie fortzugehen, durch jenen Zwang nicht aufgehoben; denn beim Aufhören dieses Zwanges sehen wir einen Körper sofort in derjenigen Richtung weiter gehen, welche er im Momente des Aufhörens hatte, d. i. in der Richtung der Tangente an die krumme Bahnlinie; z. B. wenn wir einen Faden mit einem daran gebundenen Gewichte im Kreise schwingen, so bewegt sich das Gewicht, wenn der Faden reißt, in der Richtung der Tangente für den Punkt des Losreißens fort. Diese tangentiale Kraft des Körpers ist dem Drucke der lebendigen Kraft gleich; denn sie ist ja nichts anderes als das Bestreben des Körpers, nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie weiter zu gehen. Wenn ein Körper nun wirklich nach Aufhören des Zwanges in gerader, tangentialer Richtung weiter geht, so

entfernt er sich von seiner krummen Bahn, und wenn diese ein Kreis war, von dem Mittelpunkte des Kreises; folglich ist auch schon vorher ein Bestreben vorhanden, sich von der Bahn, von dem Centrum zu entfernen; daher wird in der Richtung von dem Centrum nach dem Umfange hin ein Druck gegen die Bahn ausgeübt, den man die Centrifugalkraft oder Fliehkraft des Körpers nennt. Die Größe dieser Kraft muß ebenfalls der lebendigen Kraft des Körpers proportional sein; denn sie rührt ja von dem Bestreben her, in gerader Linie weiter zu gehen. Eine flüchtige Betrachtung zeigt indeß auch, daß sie in umgekehrtem Verhältnisse zu dem Radius der Bahn steht: denn je stärker die Bahn gekrümmt, je kleiner also der Radius ist, um so mehr entfernt sich ein Körper bei einem und demselben Wege von derselben. Genauer wird dies später in 141. bewiesen werden; es wird dort festgestellt, daß die Centrifugalkraft $F = mv^2 : r$, oder die Centrifugalkraft eines Körpers ist direct proportional der lebendigen Kraft desselben und umgekehrt proportional dem Radius seiner Bahn. Die Richtigkeit dieser Formel ist mit der Schwungmaschine nachzuweisen. Näheres hierüber bei der Centralbewegung.

Aufgabe 63. Wie groß ist die Centrifugalkraft einer 0,1kg schweren Bleikugel, die an einem 1m langen Faden 3 mal per Secunde im Kreise geschwungen wird? Aufl.: $v = 3 . 2 . 3{,}14 . 1 = 18{,}84$m; $r = 1$m; $m = 0{,}1 : 10 = 0{,}01$; daher $F = 3{,}55$kg. — A. 64. Wie groß ist die Schwungkraft eines Aequatorbewohners? Aufl.: $v = 461$m; folglich $F = \frac{1}{289} p$, wo p das Gewicht des Körpers. — A. 65. Wann würde die Schwere eines Aequatorbewohners durch seine Schwungkraft aufgehoben? Aufl.: Wenn die Erde sich 17 mal schneller drehen würde. — A. 66. Wann wäre überhaupt die Schwungkraft eines Körpers dem Gewichte desselben gleich? Da $F = mv^2 : r = (p : g.) (v^2 : r)$, so wäre $F = p$, wenn $v^2 : rg = 1$ wäre, wenn also $v^2 = rg$. — A. 67. An unserer Schwungmaschine verhält sich das große Rad zum kleinen, wie 37 : 8; in einer Entfernung von 15cm von der Achse des kleineren Rades sitzt ein Gewicht von 62,5g; welches Gewicht kann dasselbe heben, wenn das große Rad in 1 Sec. 1 mal gedreht wird? Aufl.: ca 0,7kg. —

47 **6. Die Ausdehnbarkeit und das Thermometer.** Die Ausdehnbarkeit (Extensibilität) ist die Eigenschaft, daß jeder Körper seinen Rauminhalt oder sein Volumen vergrößern kann; den Gegensatz zu derselben bildet die Zusammendrückbarkeit (Compressibilität), nämlich die Eigenschaft, daß das Volumen jedes Körpers verkleinert werden kann. Das Letztere geschieht, wenn auf den Körper ein Druck ausgeübt wird, oder besser, da alle Körper schon unter dem Drucke der Luft stehen, wenn der Druck auf den Körper vermehrt wird; es geschieht aber auch, wenn die Wärme eines Körpers vermindert, wenn der Körper abgekühlt wird. Umgekehrt dehnt sich der Körper aus, wenn der Druck auf denselben verkleinert, oder wenn eine aus einander ziehende Kraft auf denselben ausgeübt wird, sowie wenn der Körper erwärmt wird. Durch Druck werden die festen Körper sehr verschieden stark zusammengepreßt, im Allgemeinen um so mehr, je poröser sie sind. Die flüssigen Körper haben keine Lückenporen, und ihre Moleküle sind nicht viel weiter von einander als bei den festen Körpern; daher ist ihre Zusammendrückbarkeit durch den Druck gering. Sehr groß ist dagegen diejenige der luftförmigen Stoffe, weil ihre Moleküle sehr weit von einander entfernt sind; auch ist dieselbe sehr regelmäßig: genau so, wie der Druck wächst, nimmt das Volumen ab (Mariotte's Gesetz). Ebenso verhält es sich mit der Ausdehnbarkeit bei Verminderung des Druckes; die Luftarten dehnen sich hierdurch am meisten aus. Auch durch die Wärme dehnen sich die Luftarten am meisten aus; dann folgen die Flüssigkeiten; am geringsten, aber mit unüberwindlicher Gewalt dehnen sich die festen Körper aus. Von dieser Einwirkung der Wärme macht man viele Anwendungen; z. B. auf der verschwindend kleinen Ausdehnbarkeit des Glases und auf der großen und gleichmäßigen Ausdehnbarkeit des Quecksilbers durch die Wärme beruhen die Thermometer, die Apparate zum Bestimmen der Wärmehöhe oder der erwärmenden Kraft der Wärme oder der Temperatur.

Die gewöhnlichen Thermometer bestehen aus einer sehr engen Glasröhre, an welche eine Kugel angeblasen ist. Die Kugel und ein Theil der Röhre sind mit Quecksilber gefüllt, der übrige Theil ist luftleer und zugeschmolzen. Nimmt nun die Temperatur zu, so dehnt sich das Glas nur außerordentlich wenig, das Quecksilber aber ziemlich stark aus. Da dasselbe nirgends sonst Raum findet, so muß es sich in den leeren Theil der Röhre ausbreiten: das Thermometer steigt. Wird die Temperatur niedriger, so zieht sich das Quecksilber zusammen; daher muß sich der in der Röhre befindliche Theil wegen der gegenseitigen Anziehung der Quecksilbertheilchen mehr nach der Hauptmasse in der Kugel hinziehen: das Thermometer fällt. Das Fallen und Steigen des Thermometers gibt demnach ein Maß für das Fallen und Steigen der Temperatur.

Um die Größe des Fallens und Steigens messen und an verschiedenen Orten vergleichen zu können, mußte man feste Grundpunkte an dem Thermometer auffinden, die für alle Orte genau dieselben sind und daher von Jedem bestimmt werden können. Man nahm dazu aus später erhellenden Gründen die zwei Punkte, an welchen das Quecksilber steht, wenn Eis schmilzt und wenn Wasser siedet. Den ersten nannte man den **Eispunkt**, den letzten den **Siedepunkt**. Den Zwischenraum der beiden Punkte theilt man in gleiche Strecken, die man auch noch über den Siedepunkt und unter den Eispunkt trägt und **Grade** nennt. Leider haben verschiedene Gradeintheilungen Eingang gefunden. Der Franzose Réaumur theilte jenen Raum in 80 Grade und schrieb an den Eispunkt 0; dieses Thermometer ist in Deutschland gebräuchlich. Der Schwede Strömer (1750) theilte den Raum in 100 Grade, schrieb indeß auch an den Eispunkt 0; dieses Thermometer ist in Frankreich und in der Wissenschaft eingebürgert. Der Deutsche Fahrenheit theilte den Zwischenraum in 180 Grade, schrieb aber an den Eispunkt 32, legte also seinen Nullpunkt 32 Grade unter den Gefrierpunkt; dieses Thermometer wird in England gebraucht, in den englischen Colonien, und wo die englische Sprache eingeführt ist; es hat also die weiteste Verbreitung. Man schreibt 37 Grade des Réaumur'schen Thermometers: 37° R; ebenso bedeuten 73° F = 73 Grade nach Fahrenheit. Die Grade nach Strömer's Skale bezeichnet man mit C, z. B. 18° C, weil man den Schweden Celsius für den Urheber dieser Skale hielt; man kann diese allgemein verbreitete Bezeichnungsweise festhalten, muß aber dann Centesimal- oder **Centigrade** lesen, da Celsius (1742) eine andere Skale vorgeschlagen hatte, nämlich an den Eispunkt 100 und an den Siedepunkt 0 schrieb (Schwed. Abhandlungen 1742 S. 204). — Grade unter Null erhalten das Minus-Zeichen und werden häufig irriger Weise Kältegrade genannt.

Es ist leicht ersichtlich, daß 4° R = 5° C, 4° R = 9° F, 5° C = 9° F, daß also Grade der einen Skala sich leicht in Grade einer anderen verwandeln lassen. Nur bei der Verwandlung von ° F muß man sich erinnern, daß dieselben von einem 32° tieferen Punkte anfangen als die anderen, daß man also vor der Verwandlung diese 32° abzählen muß; bei Verwandlung in Fahrenheit muß man diese den anderen Skalen fehlenden 32° nach der Verwandlung addiren. Es ist $1^0 R = {}^5/_4{}^0 C = {}^9/_4{}^0 F$; daher $n^0 R = {}^5/_4 n^0 C = {}^9/_4 n + 32^0 F$; ebenso $n^0 C = {}^4/_5 n^0 R = {}^9/_5 n + 32^0 F$; $n^0 F = {}^5/_9 (n - 32)^0 C = {}^4/_9 (n - 32)^0 R$.

Aufg. 68. Die Butter schmilzt bei 32° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl.: $25^3/_5{}^0$ R; $89^3/_5{}^0$ F. — A. 69. Der Weingeist siedet bei 78° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl.: $62^2/_5{}^0$ R; $170^2/_5{}^0$ F. — A. 70. Das Brom gefriert bei — 25° C; wieviel R u. F sind dies? Aufl.: — 20° R; — 13° F. — A. 71. In Jakutzk ist im Januar eine Kälte von — 43° C; wieviel R u. F? Aufl.: — $34^2/_5{}^0$ R; — $45^2/_5{}^0$ F. — A. 72. Englische Reiseberichte geben oft aus tropischen Gegenden eine Hitze von ca. 100° an; wieviel R? Aufl.: $30^2/_9{}^0$ R, eine Hitze, die auch bei uns vorkommt. — A. 73. Die höchste auf der Erde im

Freien beobachtete Temperatur (Murzuk) betrug 130° F; wieviel R u. C? Aufl.: $43\,^5/_9{}^\circ$ R; $54\,^4/_9{}^\circ$ C. — A. 74. Wie schreiben wir den Fahrenheit'schen Nullpunkt? Aufl.: 0° F = 32° F unter dem Eispunkt = $-32 \cdot {}^4/_9 = -14\,^2/_9{}^\circ$ R, eine Kälte die bei uns selten vorkommt. — A. 75. Wieviel R u. C sind 20° F? Aufl.: $-5\,^1/_3{}^\circ$ R; $-6\,^2/_3{}^\circ$ C. — A. 76. Wie schreiben die Engländer unsere Winterkälte von -10° R, bei welcher der Rhein zufriert? Aufl.: -10° R = $9\,^1/_2{}^\circ$ F. — A. 77. Schmiedeeisen schmilzt bei 1200° R, Wachs bei 48° R; wieviel C u. F sind es; Aufl.: 1500° C, 2732° F; 60° C, 140° F. — A. 78. Die größte auf der Erde beobachtete Winterkälte (in Fort Reliance) betrug -76° F. Wie viel R u. C? Aufl.: -48° R; -60° C. — A. 79. Die größte von Faraday künstlich erzeugte Kälte ist -110° C. Wie viel R u. F sind es? Aufl.: -88° R; -166° F. — A. 80. Nach älteren Angaben beträgt die Temperatur der Knallgasflamme 6800° C. — Deville machte auf die Unmöglichkeit dieser Höhe aufmerksam, da Wasser sich zwischen 2000 und 3000° theilweise zersetze. Genauere Rechnungen von Bunsen (1867) ergaben nur 2844° C. Um wie viele R u. F differiren diese Angaben? Aufl.: $3228\,^4/_5{}^\circ$ R; $7296\,^4/_5{}^\circ$ F. —

---

3. Allgemeine Kräfte.

49 Allgemeine Kräfte sind solche Kräfte, welche entweder in allen Körpern enthalten sind oder doch in allen Körpern hervorgerufen werden können. Zu den ersteren gehören die Anziehung und die Wärme, zu den letzteren der Schall, das Licht, die Elektricität und der Magnetismus. Die 5 letzteren sind Energien, lebendige Kräfte oder Spannkräfte, und werden demnach in Arbeitsmaß gemessen oder auch durch einen gewissen Betrag ihrer specifischen Wirkung, wie z. B. die Wärme durch Calorien. Die Anziehung ist gewiß auch das Resultat einer unbekannten Energie; sie ist aber nicht selbst Energie, sondern ein Druck oder Zug, wird also auch durch die Einheit von Druck und Zug, durch Gewichte gemessen; die anderen Kräfte, die Energien, bewirken ebenfalls Druck und Zug, der aber nach der Größe des Widerstandes und dem Wege gemäß verschieden ist. Dieser Druck oder Zug wird häufig ebenso, wie der Widerstand und der von der Anziehung ausgeübte Druck oder Zug mit dem Worte Kraft bezeichnet und durch Gewichte gemessen.

1. Die Anziehung oder Attraction.

50 **Die Anziehung ist die Kraft der Körper, in Folge deren sie sich einander nähern.** Das Vorhandensein derselben in allen Körpern ist durch eine große Anzahl von Erscheinungen und Versuchen dargethan. Beim Krystallisiren schießt die krystallisirende Masse lebhaft nach einem Krystallkeime hin; die Krystalle setzen sich vorwiegend an feste Körper, an eingehängte Fäden, an den Rand des Gefäßes an; weitere Hinweise sind in 9. aufgezählt. Bouguer und Condamine fanden schon 1740, daß der Chimborasso ein Bleiloth in einer gewissen Entfernung um 7,5″ von der lothrechten Richtung ablenke. Maskelyne und Hutton stellten ähnliche Versuche an dem Berge Shehallien in Perthshire 1776—1778 an und fanden eine Ablenkung von 5,83″. Cavendish hängte 1798 an einer höchst empfindlichen Drehwage Bleikugeln auf und fand, daß dieselben von einer anderen Bleikugel mit 22^{cm} Durchmesser eine Anziehung erlitten, deren Größe er gleich $^1/_{50\,000\,000}$ des Kugelgewichtes bestimmte.

Aus dieser Zahl geht hervor, daß die Anziehung der irdischen Körper nicht groß genug ist, um die Hindernisse der Bewegung zu überwinden, daß man sich also nicht zu verwundern braucht, wenn die Körper trotz ihrer gegenseitigen Anziehung nicht zu einander laufen.

Das Wesen der Anziehung ist uns unbekannt; möglicherweise hat sie ihren **51** Grund in der Stoßkraft der Aetheratome. Sie wirkt so, als ob sie in den Körperatomen ihren Sitz hätte, und ist demnach die Ursache, daß mehrere Atome zusammen ein Molekül bilden, d. h. eine gewisse Gruppe, welche trotz der lebhaften Bewegung der Atome ein fest zusammenhaltendes Ganzes ausmacht. Sie hat nach der verschiedenen Größe und Beschaffenheit der Massen, durch und auf welche sie wirkt, eine verschiedene Art des Auftretens und darnach auch verschiedene Namen.

a. Die Molekularanziehung, d. i. die Anziehung der Moleküle gegen einander; in zusammengehörendem Gegensatze zu derselben steht die Molekularabstoßung, welche in der lebendigen Kraft der Atome und Moleküle beruht oder in der abstoßenden Kraft des Aethers. Die Molekularanziehung verhindert das Zerstreuen der Moleküle, das Auseinandergehen derselben ins Unendliche; die Molekularabstoßung das Zusammenfließen derselben. Diese beiden zusammengehörenden Kräfte werden auch Molekularkräfte genannt.

b. Die chemische Verwandtschaft, d. i. die Anziehung, welche die einander sehr nahe gebrachten Atome der Körper auf einander ausüben.

c. Die Cohäsion, d. i. die Kraft, mit welcher die Theilchen eines und desselben Körpers an einander haften.

d. Die Adhäsion, d. i. die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Theilchen verschiedener Körper an einander haften.

e. Die Schwere oder Schwerkraft, d. i. die Anziehung eines Weltkörpers gegen die einzelnen Körper desselben.

f. Die Gravitation, d. i. die Anziehung der Weltkörper gegen einander.

Das Gravitationsgesetz (Newton 1782). Ob wirklich diese verschiedenen **52** Kräfte nur Modificationen einer und derselben Kraft, nämlich der Anziehung der Körperatome sind, ist zwar wahrscheinlich, kann aber nicht durchaus mit Bestimmtheit behauptet werden. Einige Forscher, wie Redtenbacher, halten dieselben für wesentlich verschiedene Kräfte. Man möchte in der That an der Einheit derselben zweifeln, wenn man beobachtet, daß Körper, die in gleichem Raume gleiches Gewicht enthalten, also eine ganz gleiche Anziehung von der Erde erleiden oder gleiche Schwere haben, doch die verschiedenste Cohäsion und ganz ungleiche chemische Verwandtschaften zeigen. Von den zwei letzten der angeführten Kräfte indessen kann man mit Bestimmtheit angeben, daß sie identisch sind. Schwere und Gravitation sind dieselbe Kraft; denn sie wirken in demselben Körper ganz in derselben Weise und nach demselben Gesetze, nämlich nach dem Gravitationsgesetze, das den Namen Newton unsterblich gemacht hat. Dieses Gesetz drückt aus, wie die Anziehung zweier Körper von ihrer Masse und von ihrer Entfernung abhängt. Die Anziehung wird nämlich in demselben Maße größer, wie die Masse eines der beiden Körper größer wird; kennt man die Anziehung, die ein Körper durch einen anderen erfährt, so kann man auch sofort die Anziehung angeben, die ein Körper von der 2, 3, 4 .... fachen Masse durch denselben Körper erfährt; diese ist nämlich 2, 3, 4 .... mal so groß als jene. Es ist uns leicht begreiflich, daß 1000 Atome eines gewissen Körpers eine 1000 fach größere Anziehung erleiden als 1 Atom desselben Körpers, weil eben ein Atom ebenso stark angezogen wird als das andere; ebenso sehen wir leicht ein, warum 1000 Atome die 1000 fache Anziehung eines Atoms desselben Stoffes ausüben. Dagegen ist es noch unerklärt, warum die Atome verschiedener Stoffe eine nach ihrer Masse verschiedene Anziehung ausüben und erleiden, und warum diese Anziehung ganz gleichmäßig mit den Massen des anziehenden und des angezogenen Körpers, oder besser gesagt, mit den Massen der sich gegenseitig anziehenden Körper wächst. Wir müssen dies so lange als ein durch zahllose Erfahrungen festgestelltes Factum

annehmen, bis das Wesen der Anziehung ergründet ist. Eher begreiflich erscheint uns schon der zweite Theil des Gesetzes, daß die Anziehung bei wachsender Entfernung abnimmt und umgekehrt. Da nämlich die Strahlen der Anziehung von einem Punkte aus sich nach allen Richtungen ergießen, so wirkt dieselbe Kraftmenge auf immer größere Kugelflächen, je weiter man sich von dem Punkte entfernt; diese Kugelflächen wachsen aber mit den Quadraten der Radien oder der Entfernungen; folglich kann auf einen und denselben Körper, wenn er in eine 2, 3, 4 .... fache Entfernung gebracht wird, nur der 4, 9, 16 ....te Theil der Kraftwirkung ausgeübt werden. Und wirklich fand Newton, daß der Mond, der die 60fache Entfernung eines Steines vom Erdcentrum besitzt, nur den 3600sten Theil der Anziehung erfährt, die auf den Stein ausgeübt wird, und daß die Erde, deren Entfernung von der Sonne nur den 5ten Theil der des Jupiters beträgt, von der Sonne die 25fache Anziehung des Jupiter erleidet.

Bezeichnen wir demnach diejenige Anziehung, welche zwei Körper, deren Masse = 1 und deren Entfernung = 1 ist, auf einander ausüben, mit C, so ist die Anziehung der Masse m auf die Masse m' in der Entfernung 1 = C . mm', jedoch in der Entfernung r ist $k = C \cdot mm' : r^2$. Dies ist der mathematische Ausdruck von Newton's Gravitationsgesetz . . . . (12)

Oder mit Worten: **Die Anziehung zweier Körper steht im geraden Verhältnisse zu ihren Massen und im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat ihrer Entfernung.**

Befindet sich ein Körper im Inneren eines anderen, so gilt dieses nicht mehr nach allen Beziehungen; wir werden diesen Fall speciell in der Lehre von der Schwerkraft (78.) betrachten. Für die übrigen Anziehungskräfte ist ein Gesetz noch nicht nachgewiesen. Es wird behauptet, daß für dieselben das Gravitationsgesetz nicht gelten könne; denn wird ein Körper in zwei Theile zerbrochen, und werden dann die Theile genau mit den Bruchflächen wieder zusammengelegt, so sind die Theilchen nicht viel weiter von einander als vor dem Bruche, und haften doch nicht mehr fest an einander; es müsse also, schließt man hieraus, die Abnahme der Anziehung in viel stärkerem als dem quadratischen Maße stattfinden. Allein nach dem Bruche ist eine nicht zu beseitigende Luftschicht zwischen den Bruchflächen, welche die unmittelbare Berührung verhindert; es kann die Entfernung alsdann doch immer leicht viel größer sein als vor dem Bruche; denn 0,1mm Entfernung, die uns unmerklich erscheint, ist immerhin das 1000fache von 0,0001mm Entfernung, die doch noch keine unmittelbare Berührung ist; und in dem letzten Falle wäre die Anziehung schon die 1 000 000fache des ersten Falles, wenn das Gravitationsgesetz Geltung hätte; es scheint demnach das Gravitationsgesetz auszureichen, um den festen Zusammenhalt fester Körper zu erklären. Von dieser Seite steht also nichts entgegen, Cohäsion, Adhäsion u. s. w. als Aeußerungen der allgemeinen Anziehung zu betrachten. Die Verschiedenheiten in dem Auftreten dieser Kräfte mögen in der Stoffverschiedenheit der Körper, in der verschiedenartigen Bewegung der Moleküle und der Atome innerhalb der Moleküle ihren Grund haben.

a. Die Molekularkräfte und die Aggregat-Zustände.

53 **Feste und flüssige Körper.** Die Molekular-Anziehung und Molekular-Abstoßung bilden, in Verbindung mit der Stoffeigenthümlichkeit der Körper, die Ursache von der Art, wie die Theilchen zusammen ein Ganzes bilden, oder die Ursache des Aggregatzustandes (aggrego, zusammenschaaren). Man unterscheidet drei Aggregatzustände: den festen, den flüssigen und den luftförmigen Zustand. **Ein fester Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sich nur durch größere Kraft von einander trennen lassen,** der demnach ein selbständiges Volumen und selbständige Gestalt besitzt.

Dieser feste Zusammenhang der Theilchen ist nur möglich, wenn die Molekular-Anziehung groß ist, wenn also die Moleküle einander sehr nahe sind und sich auch nicht weit von einander entfernen: demnach können die Moleküle fester Körper nur eine geringe fortschreitende Bewegung haben, ihre hauptsächliche Bewegung muß in Schwingungen um ihre

mittlere Lage bestehen (18). Bei der vorausgesetzten inneren Bildung der festen Körper muß auch bei der Entstehung derselben die molekulare Anziehung den Haupteinfluß ausüben; da dieselbe nun, gemäß der Zusammensetzung der Moleküle aus Atomen, nach verschiedenen Richtungen in gesetzmäßig verschiedener Stärke wirkt, so müssen bei der vorwiegenden Wirkung der Molekularkräfte regelmäßig durch Ebenen begrenzte Gestalten entstehen, welche Krystalle oder den krystallinischen Zustand bilden. (Näheres 46.) Wirken noch andere Kräfte mit, so entstehen Gestalten, die nach verwickelten Gesetzen gebildet sind, wie etwa die organischen Gestalten.

Ein flüssiger Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sich mit der geringsten Kraft verschieben lassen, aber doch noch einen Zusammenhang haben; demnach hat ein flüssiger Körper zwar selbständiges Volumen, aber keine selbständige Gestalt; denn sowohl die Anziehung der Erde, als auch die Anziehung anderer nahen Körper kann die Theilchen aus ihrer Lage bringen.

Die absolut leichte Beweglichkeit kann nur dadurch neben dem, wenn auch noch so geringen Zusammenhange möglich sein, daß jedes Theilchen durch die lebendige Kraft seiner Bewegung jeden Augenblick aus dem Anziehungskreise seiner Nachbarmoleküle herausgeht, um aber sofort zu anderen Molekülen in dieselbe Lage zu kommen. Demnach müssen die Moleküle der flüssigen Körper theils fortschreitende, theils schwingende Bewegung besitzen. Es kommt daher die molekulare Abstoßung, welche aus der lebendigen Kraft der fortschreitenden Bewegung besteht, hier schon zu bedeutender Wirkung (Näheres 18.).

Wegen der absolut leichten Verschiebbarkeit der Theilchen sind größere Lücken zwischen den Molekülen unmöglich, die Flüssigkeiten besitzen keine Poren im gewöhnlichen Sinne, sind daher auch nur wenig zusammendrückbar. Dies wird durch die Versuche mit dem Piëzometer (πιέζω, zusammendrücken) bestätigt. Das Piëzometer besteht aus einem birnförmigen, mit einer sehr engen Röhre verbundenen Gefäße, welches in Wasser eingesenkt und dann durch Zupumpen von Wasser oder Luft einem starken Drucke ausgesetzt wird, nachdem man es mit der zu comprimirenden Flüssigkeit gefüllt hat. Die Versuche von Regnault (1847) ergaben, daß durch einen Druck von 1 Atmosphäre das Quecksilber um 3, Wasser um 44—50, Alkohol um 83—99 Milliontel ihres Volumens verkleinert werden. Auch das Meerwasser wird nur um 44 Milliontel comprimirt, also durch 200 Atmosphären etwa um 1 Hundertel: demnach ist das Meer in der größten Tiefe nur wenig dichter, z. B. in 2000^{m} Tiefe nur um 1 Hundertel dichter als an der Oberfläche. Nach Untersuchungen von Amagat (1877) steigt bei den meisten Flüssigkeiten (Wasser ist ausgenommen) die Compressibilität bedeutend mit der Temperatur; so ist sie z. B. für Aether bei $13^0 = 167$, bei $99^0 = 555$ Milliontel.

Ein luftförmiger Körper ist ein solcher, dessen Theilchen sämmtlich das Bestreben haben, sich auszubreiten; daher sind diese Theilchen auch sehr leicht verschiebbar, haben aber keinen Zusammenhang mehr, sondern breiten sich in jeden geöffneten Raum aus, so daß ein luftförmiger Körper weder selbständiges Volumen, noch selbständige Gestalt hat. Bei den luftförmigen Körpern überwiegt die molekulare Abstoßung.

54 Die mechanische Theorie der Gase. Um dieses Ausbreitungsbestreben (Ausdehnsamkeit, Expansibilität) zu erklären, haben Krönig und Clausius (1857) folgende, schon in 18. erwähnte Theorie aufgestellt. Alle Moleküle eines Gases sind fortwährend in lebhaft fortschreitender geradliniger Bewegung, so lange bis sie gegen eine feste Wand oder gegen andere Gasmoleküle treffen und dann zurückgeworfen werden. Krummlinig ist die Bahn der Moleküle deßwegen nicht, weil sie sich in verhältnißmäßig so großen Entfernungen von einander befinden, daß ihre gegenseitige Wirkung auf einander unmerklich ist. Aus demselben Grunde sind die Luftarten alle sehr stark zusammendrückbar; jedoch wächst die Kraft, welche zur Zusammendrückung nothwendig ist, mit der Größe dieser letztern. Diese und andere Folgerungen ergeben sich aus der gemachten Voraussetzung über die Constitution der Gase mit Nothwendigkeit. Alle in einem gewissen Volumen enthaltenen Gasmoleküle stoßen nämlich vermöge ihrer Geschwindigkeit mit einer gewissen

Kraft gegen die Grenzwand desselben; wegen der raschen Aufeinanderfolge und der gleichmäßigen Vertheilung dieser Stöße bringen sie in ihrer Gesammtheit eine Wirkung hervor, die sich als Druck gegen die Wand äußert, den man die Spannung der Luft nennt. Die Größe dieses Druckes gegen die Flächeneinheit hängt sowohl von der Zahl als auch von der Stärke der in der Zeiteinheit auf sie erfolgenden Stöße ab. Es sei nun die Zahl der in dem Volumen v enthaltenen Moleküle = n, so ist der Abstand je zweier benachbarter Moleküle = $\sqrt[3]{(v:n)}$; die mittlere Geschw. derselben, von welcher die Moleküle allerdings innerhalb gewisser Grenzen abweichen können, sei = c. Die Häufigkeit der Stöße gegen denselben Punkt in der Zeiteinheit wächst mit der Geschwindigkeit und nimmt ab, wie der Abstand der Moleküle zunimmt, ist also proportional zu $c : \sqrt[3]{(v:n)}$; die Zahl der gestoßenen Punkte in der Flächeneinheit aber ist umgekehrt proportional dem Quadrat jenes Abstandes, also proportional zu $1 : \sqrt[3]{(v^2:n^2)}$. Daher ist die Zahl der auf die Flächeneinheit erfolgenden Stöße proportional zu $c : \sqrt[3]{(v^3:n^3)}$ d. h. zu $cn : v$. Die Wirkung eines Stoßes gegen die Wand ist dargestellt durch seine Größe der Bewegung, da diese den von der bewegten Masse ausgeübten Druck angibt, also durch mc, wo m die Masse des Moleküls bezeichnet; der Druck aller in der Zeiteinheit auf die Flächeneinheit stattfindenden Stöße oder die Spannung ist also gegeben durch den Ausdruck

$p = C\,(cn : v)\,mc = C\,.\,nmc^2 : v$, worin C eine constante Größe bedeutet.

Bezeichnen wir den doppelten Werth dieser Constanten ebenfalls mit C, so können wir der vorstehenden Gleichung auch die Gestalt geben

$$pv = C\,.\,n\,.\,{}^1\!/_2\,mc^2$$

d. h. das Product aus Druck und Volumen ist proportional der Zahl der in diesem Volumen vorhandenen Moleküle und der lebendigen Kraft eines einzelnen Moleküls, d. h. kurzweg der gesammten lebendigen Kraft aller Moleküle. Diese Gesammtkraft ist aber nach der neueren Anschauung über die Wärme nichts anderes, als die absolute Temperatur, d. i. die von -273^0 an gerechnete Temperatur; ist die vom Eispunkt an gerechnete Temperatur = t, so ist die absolute Temperatur = 273 + t; daher nimmt unsere Gleichung die Form an

$$pv = C\,(273 + t)$$

welche man das Mariotte-Gaylussac'sche Gesetz nennt. Die Constante C bestimmt sich durch die Werthe, welche p und v annehmen, wenn t = 0; nennt man diese Werthe p_0 und v_0, so ist $p_0 v_0 = 273\,C$, woraus $C = p_0 v_0 : 273$. Setzen wir diesen Werth in das Gesetz ein, so erhalten wir

$$pv = p_0 v_0\,(273 + t) : 273$$

als den vollständigen Ausdruck dieses Gesetzes. So lange t sich nicht ändert, behält auch das Product pv denselben Werth; wenn also p in einem gewissen Maße größer wird, muß v in demselben Verhältnisse kleiner werden und umgekehrt oder: die Spannung verhält sich umgekehrt wie das Volumen. Man nennt diese Wahrheit das Mariotte'sche Gesetz. (Näheres und experimenteller Nachweis in der Lehre von den Luftarten 189.)

Nach der Definition der absoluten Temperatur von Clausius verhalten sich die absoluten Temperaturen zweier Gasarten, wie die Summen der lebendigen Kräfte aller in demselben Volumen v enthaltenen Moleküle; wenn daher in diesem Volumen bei dem einen Gase n, bei dem anderen n' Moleküle enthalten sind, und wenn die Geschwindigkeiten und Massen der Moleküle beider Gase bezüglich c, m und c', m' genannt werden, so hat man bei der Voraussetzung gleicher Temperatur für beide die Gleichung

$$n\,.\,{}^1\!/_2 mc^2 = n'\,.\,{}^1\!/_2 m'c'^2.$$

Es ist nun sehr wahrscheinlich, und die neueren Theorien der Chemie haben diese Hypothese von Avogadro (1811) beinahe zur Gewißheit erhoben, daß in gleichen Volumen zweier Gase gleich viele Moleküle enthalten sind, daß also n = n' ist*). Daraus folgt dann, daß bei gleicher Temperatur die lebendigen Kräfte der einzelnen Moleküle verschiedener Gasarten einander gleich sind, weil dann auch ${}^1\!/_2 mc^2 = {}^1\!/_2 m'c'^2$ wird. Man ist dadurch im Stande, die molekulare Geschwindigkeit aller Luftarten zu berechnen, wenn diejenige einer einzigen bekannt ist. So fand z. B. Clausius durch andere Untersuchungen, auf die einzugehen hier nicht der Ort ist, für welche jedoch Aufg. 61 einen An-

*) In den früheren Auflagen hatte ich den Avogadro'schen Satz aus der mechanischen Wärmetheorie abgeleitet; da indeß ähnliche gründlichere Ableitungen von Naumann, Maxwell, Lang zu lebhaften Erörterungen geführt haben, so habe ich ihn oben nur als Hypothese vorgebracht, ohne indeß alle Einwürfe für gleichberechtigt zu halten und ohne die Hoffnung aufzugeben, einen einwurfsfreien Beweis für denselben noch erbracht zu sehen. Eine der chemischen Thatsachen, die den Satz begründen, folgt sogleich in 55. und 60.

halt bietet, für den Sauerstoff bei 0° die große Geschwindigkeit von 461m; d. h. jedes Sauerstoffmolekül legt geradlinig fortschreitend in jeder Sec. einen Weg von 461m zurück. Nun ist das Molekulargewicht, also auch die Masse des Wasserstoffmol. der 16te Theil von der des Sauerstoffmol.; folglich muß $m.462^2 = \frac{1}{16} m.c'^2$ sein, woraus $c' = 1844^m$ folgt.

Wenn nun auch nicht alle Moleküle in jedem Augenblicke dieselbe Geschwindigkeit besitzen, sondern sich mehr oder minder auf- oder abwärts von diesem Mittelwerthe entfernen, so ist doch auch dieser letztere nur denkbar unter Voraussetzung großer molekularer Zwischenräume. In diese Zwischenräume einer Luftart können deßhalb die Moleküle einer anderen wegen ihrer großen Geschwindigkeit eindringen, Luftarten können sich in einander ausbreiten. Diese Eigenschaft der Luftarten, daß eine in die andere eindringen kann und muß, nennt man die Diffusion der Luftarten. Da nun die Geschwindigkeit der Luftmoleküle, wie aus obiger Rechnung hervorgeht, der Quadratwurzel aus der Masse derselben umgekehrt proportional ist, so ist auch die Diffusionsgeschw. der Luftarten umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte derselben.

Aus der Geschwindigkeit der Sauerstoffmoleküle (ca. 500m) hat man durch Betrachtungen, auf welche wir in der Wärmelehre zurückkommen, geschlossen, daß die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Zusammenstößen der Moleküle ein Fünftausendmilliontel einer Secunde beträgt, und daß die durchschnittliche Länge der Bahn jedes Moleküls zwischen zwei Zusammenstößen, also der mittlere Abstand zweier Moleküle ein Hunderttausendtel Centimeter groß ist, woraus es möglich war, den Durchmesser eines Sauerstoffmoleküls auf mindestens fünf Hundertmilliontel Centimeter zu schätzen.

Hört ein äußerer Druck auf eine Luftmasse zu wirken auf, so kehrt dieselbe vermöge ihrer Spannung wieder in ihr früheres Volumen zurück. Auch in diesem Volumen hat indessen die Luft noch eine gewisse Spannung, welche durch die Spannung der umliegenden Luftmassen aufgehoben wird. Würden aber die umliegenden Luftmassen beseitigt, oder was dasselbe ist, würde eine gewisse Luftmenge in einen absolut leeren Raum gebracht, so würde sich dieselbe nach allen Richtungen hin in den leeren Raum ausbreiten und denselben gleichmäßig mit Luft erfüllen. Eben so müßte die ganze irdische Atmosphäre sich in den ganzen Weltraum ausbreiten, wenn sie nicht durch die Anziehung der Erde festgehalten wäre. — Jenes Zurückkehren einer Luftmenge auf ihr früheres Volumen findet indessen nur dann nach aufhörendem Druck statt, wenn die Luft keine Aggregatzustand-Aenderung erfahren hat. Geht nämlich das Zusammendrücken einer Luftmenge so weit, oder wird den Atomen durch Abkühlung soviel von ihrer lebendigen Kraft entzogen, daß das Ueberwiegen der fortschreitenden Bewegung der Moleküle zu Ende ist, so ist die Luftmasse flüssig geworden, sie ist condensirt. Dadurch unterscheidet man die Luftarten.

Dämpfe und Gase. Dämpfe sind solche Luftarten, welche bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Drucke flüssig werden; Gase dagegen sind diejenigen Luftarten, welche bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Drucke luftförmig bleiben. Zu den ersteren gehören z. B. der Wasserdampf, der Alkoholdampf, der Aetherdampf; zu den letzteren Chlor, Wasserstoff, Kohlendioxyd, Sauerstoff, Stickstoff, also auch die atmosphärische Luft. Viele von den Gasen können durch höheren Druck oder durch starke Abkühlung oder durch Vereinigung beider Methoden condensirt werden; diese werden coërcible Gase genannt; solche sind z. B. Chlor, Kohlendioxyd, Schwefeldioxyd, Flußsäure, Salzsäure, Ammoniak. 55

Die großartigsten Versuche über die Condensation der Gase wurden von Faraday (1845) angestellt; derselbe erzeugte eine künstliche Kälte, welche bis zu — 110° ging. Indem er nun alle Gase einer solchen Kälte aussetzte und mit der Kälte noch einen hohen Druck verband, gelang es ihm, alle Gase flüssig zu machen, mit Ausnahme von Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd, Stickoxyd und Sumpfgas. Diese bis jetzt noch nicht condensirten Gase werden permanente oder nicht coërcible Gase genannt. Es soll aber hiermit nicht ausgesprochen werden, daß dieselben absolut permanent seien; vielmehr schließt Graham aus seinen Untersuchungen (1866), daß die Aufnahme oder Absorption von Gasen durch Flüssigkeiten oder Kolloide eine eigentliche Lösung derselben sei, d. h. daß dieselben zu Flüssigkeiten werden und als solche die Atomzwischenräume dieser Stoffe erfüllen. Da nun alle permanenten Gase absorbirt werden, so können sie auch nach Grahams Schlüssen nicht absolut permanent sein. Hinsichtlich der Absorptionsfähigkeit stehen die Gase in folgender Reihe: CO^2, H, O, CH^4, Luft, CO, N;

demnach ständen Wasserstoff und Sauerstoff den coërcibleu Gasen am nächsten und der Stickstoff wäre das permanenteste Gas. Zu etwas anderen Schlüssen berechtigen die Versuche Regnault's über die Ausdehnbarkeit der Gase durch Wärme.

In den letzten Wochen von 1877 soll es Pictet in Genf und Cailletet in Paris gelungen sein, durch Anwendung von mehreren Hunderten von Atmosphären und Kältegraden auch Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff flüssig, ja sogar fest zu machen.

Wenn wir im Vorausgehenden gemäß der neueren Anschauung den Unterschied der Aggregatzustände durch den Unterschied der molekularen Bewegungen erklärt haben, so kann doch nicht behauptet werden, daß der Grund jener Unterschiede ausschließlich hierin liege. Läge der Unterschied nur in der Stärke der Bewegung, so müßten alle Körper gleichen Zustand besitzen, wenn ihre Moleküle dieselbe lebendige Kraft der Bewegung, d. h. wenn die Körper gleiche Temperaturen hätten. Läge der Unterschied nur in der Disgregation, d. h. darin, daß in den festen Körpern die Moleküle einen geringen, in den flüssigen Körpern einen etwas größeren Abstand haben und in den Luftarten sehr weit von einander entfernt sind, was eine einfache Folge der geschilderten molekularen Bewegung sein muß, dann müßten Körper von gleicher Dichte gleichen Zustand haben, Holz müßte flüssig sein, Quecksilber müßte größere Festigkeit als Eisen besitzen. Oder es müßten dann wenigstens diejenigen Körper gleichen Zustand haben, die in gleichem Volumen gleich viele Moleküle enthalten; allein auch dieses ist nicht der Fall. Denn dividirt man die Gewichte gleicher Volumina fester Körper mit ihren Molekulargewichten, so erhält man zwar Zahlen, welche die relative Zahl der Moleküle in gleichen Räumen angeben; aber diese Molekülzahlen sind nicht einander gleich; ebenso wenig ist dies bei den flüssigen Körpern der Fall. Umgekehrt ergeben sich für Schwefel und Quecksilber ungefähr gleiche Molekülzahlen, während dieselben doch einen verschiedenen Zustand haben. — Es kann also der Aggregat-Unterschied weder ausschließlich in der Disgregation, noch in der lebendigen Kraft der Moleküle begründet sein, sondern in der Verbindung dieser beiden Eigenschaften mit der materiellen Beschaffenheit oder dem Stoffunterschiede der Körper. Dieses beweist uns besonders folgende Betrachtung. In den Luftarten sind die Moleküle so weit von einander, daß die Anziehung, also auch der Stoffunterschied keinen Einfluß mehr haben kann. Dann hängt aber auch der Zustand nur von dem Abstande der Moleküle ab; denn einige einfache Divisionen zeigen, daß bei den Luftarten dasjenige erfüllt ist, was wir eben bei den flüssigen und festen Körpern vermißten; die Luftarten haben nämlich gleiche Molekülzahlen, in gleichem Volumen gleich viele Moleküle; und jeder Körper, dessen Molekülzahl derjenigen der Luftarten gleich geworden ist, ist auch eine Luftart geworden. Wo also die materielle Beschaffenheit keinen Einfluß mehr haben kann, wie in den Luftarten, bedingt die Disgregation allein den Zustand; in den festen und flüssigen Körpern dagegen wird derselbe durch das Zusammenwirken der materiellen Beschaffenheit und der Disgregation begründet.

b. Die chemische Verwandtschaft und die moderne Chemie.

56 Die chemische Verwandtschaft oder Affinität ist die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Atome der Körper an einander haften, und vermöge welcher zwei oder mehrere Körper sich zu einem neuen Körper mit neuen Eigenschaften verbinden.

Das Wesen der chemischen Verwandtschaft ist uns noch unbekannt. Früher hielt man sie für eine besondere, jedem Stoffe eigenthümliche, noch neben der allgemeinen Anziehung vorhandene Attraction, welche in jedem Körper einem anderen Körper gegenüber eine verschiedene Größe, ja sogar unter verschiedenen Umständen eine verschiedene Stärke besitze; bei dieser Ansicht blieb die Kraft unerklärt und viele Erscheinungen blieben räthselhaft. Die elektro-chemische Theorie findet den Grund der chemischen Verbindungen in der entgegengesetzten Elektricität der Bestandtheile, vermöge welcher diese sich anziehen und innig verschmelzen müßten. In neuerer Zeit sucht man die chemischen Erscheinungen durch die Molekularkräfte zu erklären; man bedarf allerdings auch noch der Anziehung der Atome gegen einander, ist aber nicht genöthigt, dieselbe von der allgemeinen Anziehung zu scheiden, da außer dem Zusammenhaften der Atome alle Erscheinungen durch die Bewegungen der Atome und Moleküle erklärt werden.

Man setzt gemäß der neueren Wärmelehre voraus, daß nicht blos die Moleküle in steter Bewegung seien und zwar bei jedem anderen Stoffe in anderer Bewegung, sondern daß auch die Atome eines Moleküls innerhalb desselben schon die mannigfachsten Bewegungen ausführen müßten. Außerdem nimmt man, wie schon erwähnt,

an, wozu man durch Wärme-Erscheinungen die triftigsten Gründe hat, daß auch die Elemente aus Molekülen beständen, von denen jedes zwei oder mehrere Atome enthalte. Wenn nun Moleküle verschiedener Stoffe zusammentreffen, so können sowohl die Bewegungen der ganzen Moleküle, als auch die der Atome, als auch beide vereint, gemäß den Gesetzen des Stoßes Vertauschungen der Atome und dadurch die Entstehung neuer Moleküle veranlassen, deren Atome alsdann durch die molekulare Anziehung an einander haften. Vermittels dieser neuen, wohl begründeten Annahmen erklären sich folgende früher räthselhaft gebliebenen, allgemeinen chemischen Erscheinungen:

57 a. Die stärkere chemische Wirkung im Zustande des Entstehens oder in statu nascendi. Viele Elemente zeigen im freien Zustande nur schwache Verwandtschaften, verbinden sich aber leicht, wenn sie aus der Masse eines chemischen Processes hervortreten oder entstehen. Im freien Zustande sind ihre Atome zu Molekülen verbunden; ehe demnach ein Atom eine neue Verbindung eingehen kann, muß erst die Kraft überwunden werden, mit der es von den übrigen Atomen in dem Molekül festgehalten wird; tritt aber das Atom isolirt aus einem chemischen Processe heraus, so steht seiner Verbindung kein Hinderniß entgegen. Der freie Stickstoff verbindet sich mit Wasserstoff sehr schwierig zu Ammoniak, dagegen entsteht diese Verbindung leicht, wenn der Stickstoff aus Salpetersäure austritt. Ebenso verbindet sich der freie Kohlenstoff nur schwer mit Wasserstoff; wird aber das Kohlendioxyd der Luft an den grünen Pflanzenblättern zersetzt, so entstehen leicht die zahlreichen Kohlenwasserstoffe der Pflanzen.

b. Die verbindende Wirkung der Wärme. Da bei höherer Temperatur nicht nur die Bewegungen der Moleküle, sondern auch die Schwingungen der Atome innerhalb derselben viel heftiger werden, so wird die Kraft, mit der die Atome im Molekül an einander hängen, mehr überwunden, die Atome werden mehr losgelöst, vollbringen auch weiter ausgreifende Schwingungen und können dann leichter mit anderen Atomen zusammentreffen und leichter von solchen angezogen werden.

58 c. Die zersetzende Wirkung der Wärme und die Dissociation (Sainte-Claire Deville 1864). Weil bei steigender Temperatur die Bewegung der Atome immer stärker wird, so muß bei ununterbrochenem Steigen endlich ein Punkt eintreten, in welchem die lebendige Kraft eines Atoms die Anziehung der übrigen überwindet, so daß es im Stande ist, sich ganz von denselben zu trennen. Durch hinreichende Hitze werden demnach alle chemischen Verbindungen zersetzt; in der Sonne kann es keine chemischen Verbindungen geben. Da nun nicht anzunehmen ist, daß die bei höherer Temperatur zusammenstoßenden Moleküle regelmäßig zusammenstoßen, so wird die Bewegung der Moleküle und der Atome in verschiedenen Molekülen sehr verschieden sein; in manchen Molekülen können die Atome schon gelöst sein, in anderen nicht. Die Zersetzung der Moleküle wird an einzelnen stark getroffenen Molekülen beginnen und immer mehr zunehmen, bis endlich die Zersetzungstemperatur erreicht ist; so fängt die Zersetzung des Wasserdampfes nach Deville bei 1200° an, wird mit steigender Temperatur immer stärker und ist bei 2560° vollständig. Eine solche partielle, mit der Temperatur wachsende Zersetzung nennt man Dissociation. Man kann sogar annehmen, daß jeder Körper immer im Zustande der Dissociation sei, indem es wohl möglich ist, daß irgend ein Atom durch seine Schwingung sein bisheriges Molekül verläßt und zu einem anderen fliegt, von welchem sich dann ein gleiches Atom loslöst.

d. Die entgegengesetzten Reactionen durch die Massenwirkung. Leitet man durch einen glühenden Flintenlauf einen Strom von Wasserdampf, so verbindet sich der Sauerstoff des Wassers mit dem Eisen zu Eisenoxyduloxyd und Wasserstoff wird frei. Leitet man dagegen bei derselben Temperatur über Eisenoxyduloxyd einen Strom von Wasserstoffgas, so verbindet sich der Sauerstoff des Oxyds mit dem Wasserstoff zu Wasser und das Eisen wird frei. Dies sind entgegengesetzte Reactionen durch Wirkungen massenhafter Gasströme; nach der chemischen Verwandtschaft sind dieselben ganz räthselhaft, da im ersten Falle der Sauerstoff größere Verwandtschaft zum Eisen zeigt als zum Wasserstoff, im zweiten aber bei derselben Temperatur größere Verwandtschaft zum Wasserstoff als zum Eisen. Die Dissociation gibt die Erklärung. Im ersten Falle wird Wasserdampf dissociirt, einige Moleküle Wasserdampf zersetzen sich bei der Glühhitze immer, die frei fliegenden Sauerstoffatome können sich in statu nascendi leicht mit dem Eisen verbinden, der Wasserstoff aber wird von dem Dampfstrome fortgeführt. Im zweiten Falle werden immer einige Wasserstoffmoleküle dissociirt, die frei fliegenden Atome derselben können sich mit dem Sauerstoff verbinden zu Wasserdampf, der von dem Gasstrome fortgerissen wird. In einem vollständig geschlossenen Raume entsteht dagegen ein Gleichgewichtzustand zwischen gewissen Mengen Fe^3O^4, Fe, H^2O und H^2.

e. Die einfache Wahlverwandtschaft. Pfaundler, der diese Erklärungen (1867 und 1874) gegeben hat, bezeichnet das Verhalten der auf einander einwirkenden Stoffe eines Gemenges als „Concurrenz der Moleküle", in welchem „Kampf ums Dasein" diejenigen Moleküle den Sieg davon tragen, die entweder durch ihre Gasform aus der Concurrenz herausfliegen oder durch ihre Unlöslichkeit niederfallen u. s. w. Bringen wir z. B. Salzsäure und Eisenpulver zusammen, so wird durch die schweren Eisenatome das leichte Wasserstoffatom aus dem Chlorwasserstoffmolekül hinausgestoßen, so daß Chloreisenmoleküle zurückbleiben; die hinausgestoßenen Wasserstoffatome vereinigen sich zu Wasserstoffmolekülen, welche vermöge ihrer großen Geschwindigkeit von 1844ᵐ leicht aus dem Bereiche der Einwirkung wegfliegen, sich zu Gasblasen vereinigen und dadurch in der Flüssigkeit aufsteigen, während die Chloreisenmoleküle in der Flüssigkeit gelöst bleiben und vieles Eisen unangegriffen zurückbleibt; wenn man durch Erhitzen die Dissociation der Eisenmoleküle unterstützt, so geht der Proceß rascher vor sich.

59 f. Die doppelte Wahlverwandtschaft. Werden Bariumnitrat und Natriumsulfat zusammengegossen, so können durch die fortwährende Dissociation auch Moleküle von Natriumnitrat und Bariumsulfat entstehen. Wären alle 4 Stoffe gleich löslich, also gleich begünstigt, so würde ein gewisser Gleichgewichtszustand zwischen denselben hergestellt werden. Nun ist aber das Bariumsulfat unlöslich, es ist daher dadurch begünstigt, daß irgend einige zusammentreffenden Moleküle durch ihr großes Gewicht zu Boden fallen, also aus dem Kampf ums Dasein herausscheiden. Dann muß durch die fortwährende Dissociation sich wieder der Gleichgewichtszustand herstellen, also wieder Bariumsulfat entstehen, das wieder zu Boden fällt; endlich ist alle Schwefelsäure und alles Barium niedergesunken und es bleibt nur Natriumnitrat übrig. Hiermit ist auch erklärt, wie eine schwächere Säure einer stärkeren ein Metall aus einem Salz wegreißen kann, wenn die erstere eine unlösliche, letztere eine lösliche Verbindung bildet u. s. w.

g. Die prädisponirende Wahlverwandtschaft. Die Chemiker kennen viele Fälle, in welchen die Bildung einer Säure durch Anwesenheit einer Basis befördert wird, mit welcher dann die Säure ein Salz bilden kann. Der Name „Prädisponiren" drückt deutlich die alte Ansicht aus, daß die Wirksamkeit der Basis den Schein eines mit bewußtem Zwecke ausgeführten Handelns an sich trage. Finden sich z. B. in der Nähe einer Mauer faulende thierische Stoffe, so glaubte man, das Vorhandensein des Kalkes bewege den Stickstoff und Sauerstoff der thierischen Stoffe, sich zu Salpetersäure zu verbinden, damit die Basis durch eine Säure gesättigt werde. Wir können diesen Vorgang erklären, indem wir annehmen, daß durch die Molekularstöße auch ohne Anwesenheit der Basis kleine, vielleicht gar nicht nachweisbare Mengen der Säure entstehen, die auch fortwährend wieder zurückgebildet würden. Bei Anwesenheit der Basis wird das Salzbildungsvermögen der Säure mit der ersteren zu einer nützlichen Eigenschaft, indem sie die gebundene Säure vor der Rückbildung beschützt und ihre Anhäufung ermöglicht. So entsteht der Mauersalpeter. (Pfaundler 1874).

60 h. Das Avogadro'sche Gesetz (1811). Nach den oben angegebenen Grundansichten der modernen Chemie sind die Moleküle die kleinsten, frei existirenden Mengen der Stoffe, die Atome aber die kleinsten in Verbindung vorhandenen Mengen der Elemente. Bekanntlich besteht nun das Charakteristische der chemischen Verbindungen darin, daß die Stoffe sich nur in ganz bestimmten Gewichtsmengen mit einander verbinden; so verbindet sich immer ein Gewichtstheil Wasserstoff mit 8 Gewichtstheilen Sauerstoff zu Wasser. Man erklärt dies durch die Annahme, daß die Atome untheilbar und von bestimmtem Gewichte sind, und sich nur in ganzen Atomen an einander lagern können. Wieviele Atome aber sich mit einander zu einem Molekül verbinden, und wieviel die Atome sich in ihrem Gewichte unterscheiden, ist durch jene Verbindungsgewichte noch nicht festgestellt; so könnte z. B. Wasser aus 1 Atom O und 1 Atom H bestehen, wenn das O-Atom das 8fache Gewicht des H-Atoms hätte; es könnte auch aus 2 At. O und 1 At. H bestehen, in welchem Falle das O-Atom das 4fache Gewicht des H-Atoms haben müßte; auch aus 1 At. O und 2 At. H könnte es bestehen; dann müßte aber das O-Atom das 16fache Gewicht des H-Atoms besitzen. Die regelmäßigen Verbindungsgewichte geben daher wohl einigen, aber keinen sicheren Anhalt über das Verhältniß der Atomgewichte zu einander. Nun hat man aber noch andere Mittel, die specifische Wärme, den Isomorphismus und andere chemische Erscheinungen, welche über das Verhältniß der Atomgewichte zu einander Aufschluß geben; man hat gefunden, daß das Wasserstoffatom das leichteste aller Atome ist, daß 1 Sauerstoffatom das 16fache, ein Chloratom das 35fache, 1 Fluoratom das 19fache, 1 Bromdampfatom das 80fache, 1 Joddampfatom das 127fache Gewicht des Wasserstoffatoms besitzt, welche Zahlen man bekanntlich Atomgewichte nennt. Vergleicht man nun mit diesen Atomgewichten die spec. Gew. der Gase, vorausgesetzt, daß dieselben auf das spec. Gew. des Wasserstoffs = 1 bezogen sind, so findet man, daß die spec. Gew. den Atomgewichten

gleich sind. Die Atomgewichte sind nun allerdings nicht die Gewichte der kleinsten, frei existirenden Mengen; diese sind vielmehr die Molekulargewichte, welche bei den Elementen, deren Moleküle aus 2 Atomen bestehen, doppelt so groß als die Atomgewichte sind, also $H^2 = 2$, $O^2 = 32$ u. s. w.; es sind also die Molekulargewichte doppelt so groß als die spec. G. Bezieht man dieselben aber auf $H^2 = 1$, so stimmen sie ebenfalls mit den spec. G. überein. Dies ist nur dadurch erklärlich, daß gleiche Volumina verschiedener Gase dieselbe Anzahl von Molekülen enthalten; denn wenn ein Sauerstoffmolekül das 16fache Gewicht des Wasserstoffmoleküls hat, und wenn ein Liter Sauerstoff das 16fache Gewicht eines Liters Wasserstoff besitzt, so müssen in den beiden Liter gleich viele Moleküle enthalten sein, womit der Satz von Avogadro abgeleitet ist.

61 i. Die Regelmäßigkeit der Volumverbindungen der Gase. Ein Liter Chlor verbindet sich nicht mit 1/2 oder 1/3 oder 1/10, sondern mit 1^l Wasserstoff und zwar entstehen hierbei 2^l Salzsäuregas. In ähnlicher regelmäßiger Weise geschehen alle Verbindungen von Gasvolumina. Dies erklärt sich einfach aus den 2 Avogadro'schen Hypothesen; auch die Hypothese, daß die Elemente nicht in Atomen, sondern in Molekülen frei existiren, rührt nämlich von Avogadro her. Mengt man 1^l Chlor mit 1^l Wasserstoff, so sind gleichviel Chlormoleküle und Wasserstoffmoleküle vorhanden. Aus jedem Wasserstoffmolekül tritt ein Wasserstoffatom und wird durch ein Chloratom ersetzt, dessen Weggang aus seinem Molekül durch das Wasserstoffatom ersetzt wird; es entstehen also ebenso viel Chlorwasserstoffmoleküle als Chlor- und Wasserstoffmoleküle vorhanden waren, also ebenfalls 2 Liter. In anderen Fällen findet bei der Verbindung eine regelmäßige Verdichtung statt; so verbindet sich 1^l Sauerstoff mit 2^l Wasserstoff zu 2^l Wasserdampf; die Erklärung dafür ist ebenso einfach. Wasser ist H^2O; der Liter Sauerstoff enthält ebenso viel Atome, als die 2^l Wasserstoffmoleküle; es kann daher zu jedem Wasserstoffmolekül ein Sauerstoffatom treten und dadurch ebenso viele Wassermoleküle bilden, als Wasserstoffmoleküle vorhanden waren, so daß 2^l Wasserdampf entstehen müssen. In ähnlicher Weise bilden 3^l Wasserstoff mit 1^l Stickstoff 2^l Ammoniakgas $= NH^3$; jedes Molekül Stickstoff spaltet sich in 2 Atome und verbindet sich mit 3 Atomen Wasserstoff zu 1 Molekül Ammoniak; es entstehen ebenso viel Ammoniakmoleküle, als Stickstoffatome vorhanden waren, also 2 Liter; 4 Liter werden hier auf 2 Liter verdichtet.

62 k. Die abnormen Dampfdichten. Manchmal kommt es vor, daß das sp. G. eines Dampfes nicht gleich dem Atomgewichte ist. Diese abnormen Dampfdichten erklärt man dadurch, daß der Dampf sich in mehrere Dämpfe zersetzt hat, oder daß seine Moleküle sich gespalten oder vereinigt haben. So ist z. B. das sp. G. von Schwefeldampf bei $1000^0 = 32$, gleich dem Atomgewichte; also besteht bei 1000^0 das Schwefelmolekül aus 2 Atomen, wie bei allen Luftarten, deren sp. G. mit dem Atomgewichte stimmt. Bei 500^0 ist aber die Dampfdichte $= 96$. Dies erklärt sich durch die Annahme, daß in dem Schwefel von 500^0 statt 2 Atomen in jedem Molekül 6 Atome vorhanden sind. Wird nun Schwefel von 500^0 an erhitzt, so bleibt die Dampfdichte bis 700^0 constant, dann nimmt sie stetig ab, offenbar weil jetzt die Dissociation der 6atomigen Schwefelmoleküle beginnt, und erst bei 1000^0 wird sie wieder constant, weil dann die Spaltung der Moleküle beendigt ist. Ein anderes Beispiel ist das Phosphorchlorid PCl^5, dessen Dampfdichte bei niederer Temperatur $= 104$ ist; bei höherer Temperatur nimmt die Dampfdichte allmälig ab, weil eine Dissociation in Phosphorchlorür PCl^3 und Chlor Cl^2 stattfindet, was aus dem allmäligen Gelbwerden des anfänglich farblosen Dampfes ersichtlich ist; endlich bei 336^0 ist die Zersetzung vollendet, es sind 2 Volumina Phosphorchlorür und Chlor entstanden; deßhalb ist das sp. G. des Dampfes nur noch halb so groß.

l. Die allotropischen Modificationen. Schwefel, Selen, Phosphor, Arsen, Kohlenstoff, Silicium treten als Elemente in ganz verschiedenen Zuständen auf, in welchen sie verschiedene physikalische, ja sogar verschiedene chemische Eigenschaften haben. Für den Schwefel erfuhren wir schon die Neigung, bei höherer Temperatur seine Moleküle zu spalten, bei niedriger sie zu vereinigen; so enthält möglicherweise das Molekül des festen Schwefels noch mehr als 6 Atome, und die verschiedenen Vorkommnisse desselben, die sogenannten allotropischen Modificationen unterscheiden sich wohl durch die Zahl der Atome in einem Molekül. Auch der Sauerstoff tritt in 2 Modificationen, als gewöhnlicher und als activer Sauerstoff oder Ozon auf, in welch letzterem die Verwandtschaften zu besonders hohem Grade gesteigert erscheinen. Man erklärt dies mittels der Annahme, welche durch die Verdichtung bei der Ozonisirung gerechtfertigt wird, daß in jedem Ozonmolekül 3 Sauerstoffatome statt 2 vorhanden sind, daß zwei dieser Moleküle gegenseitig ihre Affinität sättigen und daher das 3te nur mit geringer Kraft festhalten, weßhalb dieses stärker oxydirend wirken kann. Die stärkere Wirkung des von der Sonne beschienenen Chlors und des im Palladium condensirten Wasserstoffs schreibt man ebenfalls einer solchen activen Erregung zu.

Bei der neueren Erklärung der chemischen Vorgänge wird von besonderer

Wichtigkeit die große Leichtigkeit und außerordentliche Geschwindigkeit des Wasserstoffatoms, welche bekanntlich 1844^{m} erreicht. Vermöge der ersteren kann es durch jedes andere Atom aus seiner Lage gestoßen werden, und vermöge der letzteren wird es in einem Augenblick so weit von derselben entfernt, daß eine Rückkehr unmöglich ist. Demgemäß werden die meisten chemischen Processe jetzt als Verdrängungen des Wasserstoffs, als Substitutionen von Wasserstoffatomen durch andere Atome erklärt.

So wird z. B. der bekannte Proceß der Wasserstoffbereitung oder der Zersetzung von gesäuertem Wasser durch Zink so dargestellt, daß das Zink an die Stelle des Wasserstoffs der Schwefelsäure tritt, wodurch Zinksulfat entsteht und Wasserstoff frei wird.

c. Die Cohäsion.

63 Die Cohäsion (cohaereo, zusammenhängen) ist die Kraft, mit welcher die Theilchen eines und desselben Körpers zusammenhaften; sie ist am größten bei den festen Körpern, nahezu gleich Null bei den flüssigen Körpern und gar nicht vorhanden d. h. weit überwogen durch die molekulare Abstoßung bei den luftförmigen Körpern; denn bei den festen Körpern sind die Massentheilchen einander sehr nahe, bei den flüssigen etwas weiter auseinander. Die Cohäsion wird vergrößert durch alle Mittel, welche die Dichtigkeit eines Körpers erhöhen: Messing wird durch Hämmern 3 mal fester, Tücher, Zeuge, Papier, Leder erhalten durch Pressen ihre Festigkeit, Stahl ist dichter und daher härter als Eisen. Die Massentheilchen sind auch sehr verschieden in ihrer Gestalt und Größe und können die verschiedensten Stellungen gegen einander haben; daher muß die Cohäsion ein sehr verschiedenartiges Auftreten zeigen, und diese Verschiedenheit muß um so größer sein, je mehr die Cohäsion zur Geltung kommt; demnach findet man an den festen Körpern die verschiedensten Cohäsions-Erscheinungen. Haben z. B. die Theilchen eine vorwiegende Ausbildung nach der Länge, so wird die Cohäsion in dieser Richtung groß sein, die Theilchen werden sich in dieser Richtung fester an einander setzen als in der dazu senkrechten Richtung; so finden wir die Hölzer in der Richtung ihrer Fasern fester als in jeder anderen; auch die Krystalle zeigen nach verschiedener Richtung eine verschieden große Cohäsion u. s. w.

Körper, die in einzelnen Richtungen große, in anderen Richtungen geringe Cohäsion besitzen, können in den letzten Richtungen oft bedeutende Veränderungen erleiden, ohne ihren Zusammenhang zu verlieren. Kann man Körper durch eine Zugkraft stark ausdehnen, ohne den Zusammenhang zu stören, so werden diese Körper zähe genannt; Kautschuk, geschmolzenes Glas, weiches Pech, organische Faserbündel sind zähe. Lassen sich die Körper durch Druck, Stoßen, Schlagen u. s. w. stark ausdehnen, ohne ihren Zusammenhang zu verlieren, so nennt man sie dehnbar, hämmerbar, geschmeidig u. s. w.; Gold, Platin, Silber, Eisen, Kupfer, Zinn, Blei u. s. w. besitzen diese Eigenschaft; die ersteren sind auch noch zähe, lassen sich daher zu feinem Drahte ausziehen (der Wollaston'sche Platindraht); die zwei letzteren dagegen sind nicht zähe: Bleiblech und Stanniol reißen wie Papier; dagegen ein Kupferdraht von 1^{mm} Durchmesser trägt 26^{kg}. — Lassen sich die Theilchen eines Körpers beim Eindringen an dessen Oberfläche nur schwer aus ihrer Lage bringen, so ist der Körper hart; die härtesten Körper sind Iridium, Diamant, krystallisirtes Bor und Silicium. Die Metalle besitzen im reinen Zustande keine bedeutende Härte, werden aber durch Zusammenschmelzen mit anderen Metallen oder Kohle härter. Härte darf nicht mit Festigkeit verwechselt werden; sie ist der Widerstand gegen das Eindringen an der Oberfläche, während Festigkeit der Widerstand gegen die Trennung der Theile im ganzen Körper ist. Leder hat große Festigkeit, aber geringe Härte. Der weiche Zustand ist dem flüssigen nahe, tritt daher beim Vermischen von festen, gepulverten Massen mit flüssigen oder beim allmäligem Herannahen des flüssigen Zustandes ein. Weiche Körper können doch zähe sein, wie geschmolzenes Glas, das sich in die dünnsten Fäden ausziehen läßt. Die Theilchen lassen sich aus ihrer Lage bringen, ohne den Zusammenhang einzubüßen. Guthrie (1865) unterscheidet auch bei den Flüssigkeiten Steifigkeit (stubborn cohesion) und Festigkeit (persistent cohesion), wie man bei den festen Körpern Zähigkeit und Härte unterscheidet; bei Quecksilber überwiege die Steifigkeit, bei Alkohol die Festigkeit. — Spröde ist ein Körper, wenn er bei der geringsten Gestaltänderung den Zusammenhang seiner Theilchen aufgibt. Die sprödesten Körper sind Glasthränen und Bologneser

Fläschen, welche aus rasch abgekühltem Glase bestehen; das Abbrechen der Spitze verwandelt die ersteren in Pulver, und dies geschieht mit solcher Heftigkeit, daß eine mit Wasser gefüllte Flasche zerspringt, wenn eine Glasthräne im Wasser abgebrochen wird. Durch einen leichten Ritz zerfallen die Bologneser Fläschen in viele Stücke. Spröde Metalle sind Arsen, Wismuth und heißes Zink, die sich leicht zu Pulver zerstoßen lassen. Merkwürdig ist der große Einfluß des geringen Kohlenstoffgehaltes verschiedener Eisensorten; Gußeisen (mit ca. 5% C) ist hart und spröde, Schmiedeeisen (mit höchstens $^2/_3$% C) ist weich, zähe und dehnbar, Stahl (mit $^1/_2$—2% C) ist sehr hart, zähe, dehnbar und das schärfste Gegentheil von spröde, nämlich elastisch. Elastisch ist ein Körper, wenn er bei Gestaltänderungen den Zusammenhang behält und nach Aufhören der Einwirkung in die frühere Gestalt zurückkehrt. Diese Eigenschaft ist von allen Cohäsionseigenschaften bei weitem die wichtigste, sowohl in der Anwendung als zur Erkenntniß der inneren Beschaffenheit der Stoffe; wir sehen daher die bedeutendsten Experimentatoren und mathematisch-physikalischen Forscher um die Ergründung dieser Eigenschaft bemüht.

64 **Die Elasticität.** Die Elasticität (von ἐλάω, treiben) ist die Eigenschaft, daß ein Körper durch eine äußere Kraft seine Gestalt ändern kann, ohne den Zusammenhang zu verlieren, und daß er beim Aufhören der Kraft wieder in seine frühere Gestalt zurückkehrt.

Kautschuk kann man aus einander ziehen, Guttapercha in alle nur denkbaren Gestalten drücken, dünne Stahlstreifen lassen sich spiralförmig zusammenrollen, Fischbeinstäbe stark krumm biegen, Luft läßt sich auf ein kleines Volumen zusammenpressen u. s. w.; beim Nachlassen der wirkenden Kraft aber kehren die genannten Körper wieder in ihre frühere Form zurück. Die Ursache der Rückkehr kann man verschiedenartig auffassen. Gibt man zu, daß die Anziehung langsamer ab- und zunimmt als die Abstoßung, so überwiegt beim Auseinanderziehen der Körpertheile die Anziehung und führt dieselben zurück, während beim Annähern derselben die Abstoßung überwiegend wird und die Rückkehr veranlaßt. Man kann auch die Arbeit zur Erklärung benutzen; beim Annähern theilt man den Molekülen Arbeit mit, die ihre lebendige Kraft vergrößert und ihnen daher den größeren Rückweg möglich macht; beim Entfernen der Moleküle verwandelt sich die mitgetheilte Arbeit in Spannkraft, welche die Rückkehr vollbringt.

Im gewöhnlichen Leben nennt man vorzugsweise solche Körper elastisch, welche, wie die eben angeführten, durch eine geringe Kraft schon eine große Aenderung erfahren. Genauere Untersuchungen haben indeß gezeigt, daß alle Körper elastisch sind; nur besitzen die flüssigen und luftförmigen Körper diese Eigenschaft nicht allen Kräften gegenüber. Die luftförmigen Körper dehnen sich nämlich nach Beseitigung eines äußeren Druckes wieder aus, sind also gegen eine Druckkraft elastisch; aber eine Zugkraft ist an denselben nicht anzubringen; wenn man dagegen durch eine solche Kraft das Volumen eines Gases vergrößert hat, so folgt das Gas zwar in dieses Volumen, allein es kehrt nicht von selbst wieder in sein früheres Volumen zurück. Auch die flüssigen Körper verhalten sich einer Druckkraft gegenüber elastisch, was schon aus dem Zurückspritzen auffallender Tropfen und aus den Wassermäuschen zu erkennen ist; sie lassen sich auch durch Wärme ausdehnen, aber nicht durch eine Zugkraft. Die festen Körper dagegen offenbaren ihre Elasticität sowohl einer Druckkraft als auch einer Zugkraft gegenüber. Daß wirklich selbst die härtesten festen Körper diese Eigenschaft besitzen, kann man einfach durch einen Versuch mit Kugeln von Elfenbein, Metall u. s. w. zeigen, die man auf eine glatte mit Ruß überzogene Platte, etwa von Marmor fallen läßt; die Kugeln zeigen dann nicht punktförmige, sondern kreisförmige Flecke, die um so größer sind, je höher die Kugeln herabfielen; hierdurch ist dargethan, daß dieselben im Moment der Berührung zusammengedrückt waren.

Wenn wir sonach die Eigenschaft der Elasticität auch bei solchen Körpern wahrnehmen, die dem gewöhnlichen Blicke unelastisch erscheinen, so ergibt eine noch nähere Untersuchung, daß die Kraft der Elasticität gerade bei diesen Körpern am größten ist. Die Elasticität ist bekanntlich eine Spannkraft, wird also eigentlich durch Arbeit gemessen; indessen übt sie wie jede Spannkraft einen Druck oder Zug aus und zwar auf dem bekannten Wege, auf welchem der Körper in seine frühere Gestalt zurückkehrt; das Wesentliche und Unbekannte ist jener Druck oder Zug. Unter Kraft

der Elasticität verstehen wir daher den Druck oder Zug, durch und mit welchem die aus ihrer Lage gebrachten Theilchen in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren; dieser Druck oder Zug ist gleich dem Widerstande, mit welchem der Körper einer weiteren Aenderung seiner Form, einer weiteren Verschiebung seiner Theilchen entgegenwirkt; und dieser Widerstand ist nach dem Satze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" derjenigen äußeren Kraft gleich, welche die Veränderung hervorgebracht hat. Wäre die Elasticität kleiner wie die äußere Kraft, so würde diese noch eine weitere Aenderung bewerkstelligen können; wäre die Elasticität größer, so würde sie einen Theil der Aenderung aufheben; also ist bei dem erreichten Grade der Aenderung die Elasticität gleich der äußeren Kraft. Demnach gibt über die Größe der Kraft der Elasticität, oder kürzer über die Größe der Elasticität diejenige Kraft Aufschluß, welche in verschiedenen Körpern eine und dieselbe Aenderung hervorbringt, welche also z. B. alle Körper auf die Hälfte ihres Volumens zusammenpreßt oder die Länge eines Körpers verdoppelt u. dergl. mehr.

Diese Kraft ist am kleinsten bei den Luftarten; sie ist bei den Flüssigkeiten bedeutend größer als bei den Luftarten und selbst bei vielen festen Körpern. So ist sie z. B. beim Quecksilber größer als bei Kautschuk, Leder, Glas, Fischbein, Holz und Stein; nur in den schweren Metallen, Blei ausgenommen, ist sie größer als im Quecksilber. Platin, Kupfer, Messing, Schmiedeeisen, Stahl besitzen die größte Kraft der Elasticität, Luft und Kautschuk die kleinste. Dieses Resultat über die Kraft der Elasticität widerspricht der gewöhnlichen Anschauung nur scheinbar; denn diejenigen Körper, welche nur geringe Kraft der Elasticität besitzen, also der Aenderung nur einen geringen Widerstand entgegensetzen, wie Luft und Kautschuk, können auch schon durch eine kleine Kraft eine große Aenderung erfahren und haben gewöhnlich die Eigenschaft, eine große Aenderung erleiden zu können, ohne die Fähigkeit der vollkommenen Rückkehr in die frühere Form einzubüßen; diese Körper erscheinen dem gewöhnlichen Sinne als sehr elastisch. Diejenigen Körper aber, welche die Kraft der Elasticität in hohem Maße besitzen, also der Aenderung einen großen Widerstand entgegensetzen, wie Platin, Kupfer, Elfenbein u. s. w., bedürfen auch einer sehr bedeutenden Kraft zur Aenderung, erscheinen also für die Kräfte der Menschenhand unveränderlich oder wenig elastisch; diese Körper können auch meistens eine große Aenderung nicht ertragen; sie kehren nach einer solchen gar nicht oder nicht vollkommen in die frühere Gestalt zurück. Die Wissenschaft faßt diesen Unterschied durch die Begriffe der vollkommenen Elasticität und der Elasticitätsgrenze.

Man nennt einen Körper vollkommen elastisch, wenn er nach einer Aenderung genau wieder in seine vorige Gestalt zurückkehrt, und versteht unter Elasticitätsgrenze den Betrag der Veränderung, welche ein Körper erfahren darf, ohne die Fähigkeit der vollkommenen Wiederherstellung zu verlieren. Innerhalb der Elasticitätsgrenze sind also alle Körper vollkommen elastisch. Nur ist bei den meisten Körpern die Elasticitätsgrenze sehr eng gezogen; und gerade diejenigen Körper, welche große Kraft der Elasticität haben, welche sich also auch nur durch große Kräfte verändern lassen, besitzen meist sehr enge Elasticitätsgrenzen; sie können keine großen Aenderungen erleiden, ohne daß dieselben ganz oder theilweise bleibend werden. Die Körper dagegen, wie Luft, Kautschuk, Fischbein, Holz, welche sich schon durch eine kleine Kraft ändern lassen, welche also geringe Elasticität besitzen, haben eine sehr große Elasticitätsgrenze, können also große Veränderungen ertragen, ohne die Fähigkeit der vollkommenen Rückkehr zu verlieren.

Dies zeigt deutlich die Betrachtung der Tabelle in 75. Dort ist in der zweiten Colonne unter Elasticitätsmodul die Kraft angegeben, welche einen Körper doppelt so lang oder doppelt so kurz zu machen im Stande ist, und in der ersten Colonne unter Tragmodul die kleinste Kraft, welche zuerst eine bleibende Aenderung von $^1/_2$mm erzeugt. Wenn also durch 20000kg ein schmiedeeiserner Stab um seine Länge vergrößert wird, so wird er durch 15kg (nach dem ersten Gesetze in 65) um $^1/_{1350}$ ca. größer. Das Schmiedeeisen darf also nur um $^1/_{1350}$ geändert werden, so erfährt es schon eine bleibende Aenderung von $^1/_2$mm, während seine Kraft der Elasticität 20000kg beträgt. Das Fischbein aber, das nur eine Elasticität von 700kg besitzt, erfährt erst durch 5kg diese bleibende Aenderung; die geringste bleibende Aenderung, die Elasticitätsgrenze, beträgt $^1/_{140}$, ist also viel größer als beim Schmiedeeisen. Nur Stahl hat einen sehr großen Elasticitätsmodul neben einer

ziemlich großen Elasticitätsgrenze und steht hierdurch allen Metallen voran. Je spröder ein Körper ist, desto kleiner ist seine Elasticitätsgrenze. Merkwürdig ist hierin das Glas; Glasthränen und Bologneserflaschen haben die größte Sprödigkeit; auch gewöhnliches Glas hat noch ziemlich enge Grenzen, innerhalb derselben aber große Elasticität, so daß Glasflächen sich biegen und schwingen können, wie die Glastrompeten beweisen; in Form der Glasfäden (Glaswolle und Schlackenwolle) aber besitzt das Glas sehr weite Grenzen. Die weitesten Grenzen, wenn auch den kleinsten Modulus, besitzen die Luftarten, insbesondere die permanenten; sie können 100fach zusammengedrückt werden, ohne die Fähigkeit der Rückkehr einzubüßen. Die Flüssigkeiten besitzen gegen Druck einen großen Modulus; eben deßwegen sind ihre Grenzen, die sehr weit zu sein scheinen, noch nicht erforscht, weil man die zu so starken Pressungen nöthigen Kräfte nicht auftreiben kann. Sie sind den festen Körpern auch darin überlegen, daß sie selbst den längst dauernden Kräften gegenüber die Fähigkeit der Rückkehr in ihr früheres Volumen nicht einbüßen, also permanente Elasticität haben.

Die Elasticität hat zahlreiche Anwendungen: die des Korkes verschließt Flaschen, die der Stahlfedern bewegt Uhren, Thürklinken, Schloßriegel, Thüren, Telegraphenhebel u. s. w., sie dient zu Kraftmessern und Federwagen, wird zum Tragen in Polstern, zum Schwächen der Wagenstöße u. s. w. verwendet. Die Elasticität der Luftarten findet Verwendung in Luftkissen, Windbüchsen, Feuerspritzen u. s. w., sie ist die Ursache der meisten Explosionen, der Wirkung des Schießpulvers, so wie auch Bogen und Ballisten auf der Elasticität beruhen. Zahllose Naturerscheinungen wären ohne die Elasticität nicht vorhanden; das Abprallen der Körper von einander beim Stoße, die Fortpflanzung des Stoßes, die Schwingungen der Theile und Theilchen aller Körper, also die Erscheinungen des Schalles, des Lichtes, der Wärme u. s. w. sind nur durch die Elasticität möglich. Nach der neueren Physik beruht die Elasticität darauf, daß schwingende Körpertheilchen, denen beim Vorangehen Arbeit mitgetheilt wird, mit einer lebendigen Kraft zurückkehren müssen, die um den Betrag der Arbeit erhöht ist.

In neuerer Zeit sind die Gesetze der Elasticität auch für die Technik wichtig geworden. Es ist schon seit längerer Zeit bekannt, daß zwar die flüssigen und luftförmigen Körper permanente Elasticität besitzen, daß aber die festen Körper unter andauernder Belastung ihre Gestalt bleibend ändern, sogar wenn diese Belastung nicht diejenige der Elasticitätsgrenze erreicht. So verlieren Stahlfedern allmälig ihre Kraft, Deckenbalken ziehen sich krumm u. s. w. Da nun die meisten Bau- und Maschinenelemente dauernde Belastungen auszuhalten haben, und da die Festigkeitsverhältnisse der geänderten Formen ganz andere als die der ursprünglichen Formen sind, auf deren Unveränderlichkeit bei der Erbauung doch gerechnet und berechnet wird, so wurde von Reuleaux und Moll (1854) folgender Satz aufgestellt: die Belastung der Bau- und Maschinentheile darf nur einen gewissen Bruchtheil der Belastung für die Elasticitätsgrenze betragen, darf also dieselbe nicht erreichen und noch weniger oder höchstens bei Probeversuchen über dieselbe hinausgehen. Die Technik hat diesen Satz ziemlich allgemein angenommen. Es ist daher die Belastung für die Elasticitätsgrenze, welche Weisbach und Reuleaux Tragmodul nennen, und welche auch für die Elasticitätsgrenze selber gelten kann, für die Technik von Bedeutung. Man ist übereingekommen, den Tragmodul durch das Gewicht in kg auszudrücken, das einem Stabe von 1m Länge und 1qmm Querschnitt eine bleibende Verlängerung von 1/3mm zu ertheilen vermag; dieses Gewicht beträgt z. B. für zu Draht gezogenen Gußstahl 65kg, sinkt aber durch Glühen des Stahles bis auf 5kg herab, was darauf hinweist, daß Gluth die moleculare Beschaffenheit der Körper ändert; indessen ist bei anderen Körpern die Abnahme nicht so stark als bei Gußstahl. Die Tabelle in 75. enthält die Tragmodeln einiger Körper nach Wertheim u. A.

Zug- und Druckelasticität. Nach der Art der Belastung unterscheidet man: Zug-Elasticität, wenn die Belastung den Körper zu verlängern strebt; Druck-Elasticität, wenn die Belastung den Körper zusammendrückt; Biegungs-Elasticität, wenn der Körper an einem Ende befestigt oder an beiden Enden unterstützt ist, und eine Kraft senkrecht zu seiner Länge wirkt; Torsions- oder Drehungs-Elasticität, wenn der Körper verwunden oder verdreht z. B. an beiden Enden nach entgegengesetzten Richtungen gedreht wird; Schub-Elasticität, wenn eine Kraft auf den Körper z. B. in einem Querschnitte wirkt, die ihn zu verschieben oder abzuschieben oder abzuscheeren strebt. Für den Zug und Druck ergeben sowohl die genauesten Versuche, als auch die Theorie das Grundgesetz: Die Verlängerung oder Verkürzung steht innerhalb der Elasticitätsgrenze im geraden Verhältnisse zu der Be- 65

lastung und der Länge des Körpers und im umgekehrten Verhältnisse zum Querschnitte desselben. Außerdem hängt die Größe der Formänderung noch von der Größe der Elasticität ab, also von der materiellen Beschaffenheit des Körpers. Bezeichnen wir den hierdurch ausgeübten Einfluß durch einen Coëfficienten E, Länge, Querschnitt und Belastung entsprechend mit l, q und P, so ist die Formänderung $\lambda = E \, . \, lP : q$ . . . . (14)

Setzen wir hierin $q = 1^{qmm}$ und $P = 1^{kg}$, so ist $\lambda = E \, . \, l$, woraus sich ergibt $E = \lambda : l$. — Der Coëfficient E gibt also an, welchen Bruchtheil der ganzen Länge die Aenderung beträgt, wenn auf einen Stab von 1^{qmm} Querschnitt eine Zug- oder Druckkraft von 1^{kg} wirkt. Man nennt diese für Stäbe von demselben Material constante Zahl den Elasticitäts-Coëfficient. Dieser ist nur ein sehr kleiner Bruch, gibt also keinen augenfälligen Maßstab für die Kraft der Elasticität. Man hat daher den reciproken Werth von E, der jedenfalls eine große Zahl ist, also den Bruch $1/E$ als Maß für die Größe der Elasticität eingeführt und diesen Werth Elasticitäts-Modul genannt und mit m bezeichnet. Derselbe gibt auch eine sehr treffende Anschauung für die Größe der Elasticität. Denn man erhält denselben aus der Formel (13), wenn man dort $q = 1$ und $\lambda = l$ setzt; alsdann hat man $l = E \, . \, lP$, woraus $P = 1/E = m$. — Also ist der Elasticitäts-Modul m diejenige Kraft, welche einen Stab von 1^{qmm} Querschnitt um seine eigene Länge unter Voraussetzung vollkommener Elasticität bis dahin auszudehnen vermöchte. Derselbe läßt sich natürlich nicht direct beobachten, weil kein Stab sich so weit ausdehnen läßt, ohne zu reißen; er läßt sich aber nach Formel (13) aus jeder genauen Beobachtung leicht berechnen. Die Tabelle in 75. enthält die Elasticitäts-Modeln verschiedener Körper.

Bei der Verlängerung oder Verkürzung eines Stabes bleibt der Querschnitt nicht ungeändert, sondern er verkleinert oder vergrößert sich; jedoch verändert sich der Querschnitt nicht etwa in dem Maße, daß das Volumen des Stabes ungeändert bleibt; vielmehr hat schon Poisson (1829) theoretisch gefunden, daß die Volumänderung etwa $1/2$ der Längenänderung betrage und daraus geschlossen, daß die Aenderung des Radius $1/4$ der Längenänderung ausmache. Wertheim stellte Versuche (1848) an, und fand für dieses Verhältniß μ der Quercontraction zur Längendilatation den größeren Werth $1/3$. Neuere Untersuchungen von Kirchhoff (1859), von Okatow (1863) und von Schneebeli (1870) ergaben, daß μ zwar für einen und denselben Stoff von den Dimensionen des Stabes unabhängig sei, sich jedoch mit dem Zustande des Stabes ändere und auch für verschiedene Stoffe, entgegen Poissons Meinung, Verschiedenheiten von allerdings geringer Bedeutung darbiete; die Größe von μ ist nach diesen Versuchen etwa 0,3. — Auch der Elasticitätsmodul eines Körpers ist nicht ganz constant; so fand schon Kupffer (1856), daß derselbe nicht unabhängig von der Temperatur sei, sondern z. B. beim Eisen mit steigender Temperatur abnehme. Kohlrausch und Loomis (1870) untersuchten diese Aenderung mit der Temperatur genauer und fanden sie stärker, als die Aenderung der Ausdehnbarkeit und des Lichtbrechungsvermögens durch die Wärme, kleiner als die Aenderung des galvanischen Leitungswiderstandes, und gleich der Aenderung des permanenten Magnetismus und der specifischen Wärme; auch nimmt die Größe der Abnahme mit der Temperatur zu, ähnlich wie der Ausdehnungscoëfficient. Viele Metalle haben mehrfache Elasticitätsgrenzen und verschiedene Elasticitätsmodeln. Bei manchen Metallen und vorzugsweise bei organischen Körpern tritt die Erscheinung der elastischen Nachwirkung auf, welche darin besteht, daß sowohl die Veränderung wie auch die vollkommene Rückkehr oft einer sehr langen Zeit (Tage, ja Wochen) bedarf.

66 Aufg. 81. Ein Eisenstab von 3^{mm} Durchmesser und 20^{cm} Länge wird durch ein angehängtes Gewicht von $1475{,}146^{kg}$ um 2^{mm} verlängert. Welches ist der Elasticitäts-Modul des Eisens? Aufl.: Man kennt die ausdehnende Kraft für 2^{mm} Verlängerung und einen Querschnitt von $9/4\,\pi$; daraus findet man nach dem Gesetze in 65. die ausdehnende Kraft für 20^{cm} Verlängerung und den Querschnitt von $1^{qmm} = 20\,869^{kg} = m$. — A. 82. Der Elasticitätsmodul des Fischbeins $= 603$; welche Ausdehnung wird ein 8^{mm} breiter, 2^{mm} dicker und 150^{mm} langer Fischbeinstab durch einen angehängten Centner erleiden? Aufl.: Nach (13) ist $\lambda = 0{,}77^{mm}$. — A. 83. Eine Gußstahlstange von 2^{m} Länge soll durch einen Druck von 1000^{kg} nur bis zu $1/5$ der Elasticitätsgrenze beansprucht, d. i.

ausgedehnt oder zusammengedrückt werden; welchen Durchmesser muß dieselbe haben? Der Tragmodul = 55, der Elasticitätsmodul = 19549, daher die Elasticitätsgrenze = $^{55}/_{19549}$; die verlangte Formänderung soll nur $^1/_5$ derselben betragen, also nur $^{11}/_{19549}$. Hieraus findet man mit Benutzung von Formel (13) den Durchmesser = 10,8^{mm}. — A. 84. Wie verhalten sich die Ausdehnungen zweier Stangen von kreisförmigem und quadratischem Querschnitte, wenn Kreis-Durchmesser und Seite des Quadrates = 5^{cm} sind, und beide Stangen dieselbe Länge und denselben Stoff haben und von derselben Kraft afficirt werden? Wie groß muß die Seite des quadratischen Querschnittes sein, damit hier die Ausdehnung dieselbe sei wie bei der cylindrischen Stange? a. 19,635 : 25; b. Seite = 4,43^c.

67 **Biegungselasticität.** Bei der Biegung eines Körpers werden die Fasern der concaven Seite zusammengedrückt, die der convexen Seite ausgedehnt, so daß das Grundgesetz der Zug- und Druckelasticität auch hier Anwendung findet. Zwischen den verlängerten und den verkürzten Fasern muß eine Faserschichte liegen, welche ungeändert bleibt und daher neutrale Faser genannt wird. Es gehört zu den beliebtesten Problemen der analytischen Mechanik, die Gestalt der neutralen Faser nach der Biegung, die sogenannte elastische Linie, für die verschiedensten Arten der Belastung und der Unterstützung des Körpers durch Rechnung zu finden. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen den Längen- und Höhenausdehnungen der elastischen Linie aufgesucht, und dieser mathematisch ausgedrückte Zusammenhang wird die Gleichung der elastischen Linie genannt. Diese Gleichung, in welche auch die Dimensionen des gebogenen Körpers, der Elasticitätsmodul und die biegende Kraft eintreten müssen, gibt nicht blos ein Urtheil über die Gestalt der elastischen Linie, sondern auch über den Punkt, wo die Spannung am größten ist, und andere wichtige Größenverhältnisse. So ergibt sich, daß z. B. für einen am einen Ende eingeklemmten, am anderen Ende belasteten rechteckigen Stab die Biegung im geraden Verhältnisse zu der Kraft und zu der dritten Potenz der Länge, aber im umgekehrten Verhältnisse zum Modul, zur Breite und zur dritten Potenz der Höhe steht. Es ist hier nicht der Ort, solche Gesetze abzuleiten; auch die Gesetze über die Tragkraft der Stäbe und Balken können erst aufgestellt werden, wenn die Begriffe des statischen Momentes und des Trägheitsmomentes vorausgesetzt werden können.

68 **Torsions-Elasticität.** Bei der Torsion oder Verwindung findet die einfachste und den meisten Fällen entsprechende Wirkung statt, wenn der Körper an dem einen Ende befestigt und an dem anderen Ende um sich selbst gedreht wird. Es tritt alsdann durch die Verlängerung der einzelnen Fasern in spiralförmige Windungen bekanntlich ein Bestreben des Stabes oder Fadens auf, sich in die ursprüngliche Lage zurück zu drehen. Dieses Bestreben bezeichnet man mit dem Namen Torsionskraft oder oft kurzweg Torsion. Es ist sowohl für die Physik wie für die Technik von Wichtigkeit, die Abhängigkeit der Torsionskraft von der Größe des Drehungswinkels und den Dimensionen des Körpers zu kennen. Versuche von Coulomb und Wertheim haben für einen cylindrischen Stab folgenden auch von der Theorie bestätigten Satz ergeben: Die Torsionskraft ist proportional dem Drehungswinkel, der vierten Potenz des Radius und einem Drehungsmodul, der mit dem Elasticitätsmodul in Zusammenhang steht; endlich ist sie der Länge umgekehrt proportional. — Aus diesen wenigen Andeutungen aus der Elasticitätslehre ergibt sich, wie nothwendig der Elasticitätsmodul für die Wissenschaft und die Technik ist, obgleich derselbe keine reale Bedeutung hat. Auch die Schubelasticität ist einem Schubmodul proportional, der in einfachen Verhältnissen zum Elasticitätsmodul steht, nämlich $^2/_5$ desselben beträgt.

69 **Die Festigkeit.** Die Cohäsion ist die Ursache der Festigkeit. Unter Festigkeit versteht man den Widerstand, den ein Körper der Trennung seiner Theile entgegensetzt. Nach dem Grundgesetze „Jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft" ist demnach die Festigkeit gleich derjenigen Kraft, welche eine Trennung der Theile zu bewirken im Stande ist. Denn wäre die Festigkeit größer als die äußere Kraft, so würde diese die Theile nicht zu trennen vermögen; wäre jene aber kleiner als diese, so würde schon eine kleinere Kraft die Trennung bewirkt haben; also ist die Festigkeit gleich der äußeren trennenden Kraft. Um die Festigkeit zu finden, hat man daher zahlreiche Versuche angestellt; dieselben ergaben, welche Belastungen nothwendig seien, einen Körper zu zerreißen, zu zerdrücken, zu zerbrechen, zu zerknicken, zu zer-

winden oder abzudrehen. Diese Versuchsresultate wurden in Tabellen zusammengestellt. Sodann wurde sowohl durch Versuche, als durch die Theorie nachgeforscht, wie die Festigkeit von der Form und den Dimensionen der Körper abhänge. Wollte man nun einen Körper construiren, der eine bestimmte Last tragen sollte, so rechnete man nach den Ergebnissen dieser Forschungen und nach jenen Tabellen aus, welche Form und Größe er haben müsse, damit er erst bei einer 6—20 mal so großen Belastung breche; man sagte dann, er sei auf 6—20fache Sicherheit gebaut. Es läßt sich auch nicht läugnen, daß es den Behörden, Baumeistern und dem Publikum eine gewisse Beruhigung gewähren müßte, sich sagen zu können: Diese Brücke bricht erst bei einer 20 mal so großen Belastung. Allein man kann dies nicht behaupten, weil, wie im vorigen Kapitel gezeigt wurde, Formänderungen und dadurch Festigkeitsänderungen selbst durch eine geringere, aber dauernde Belastung stattfinden. Es darf daher die Belastung nur einen gewissen Theil des Tragmoduls ausmachen, und der Körper nie bis zu seiner Elasticitätsgrenze verändert werden. Diese bildet daher jetzt die Grundlage der Festigkeitslehre; die älteren Methoden sind weniger wichtig geworden; doch gehören die Elemente derselben immer noch hierher.

Man unterscheidet nach der Art der Belastung vier Arten von Festigkeit:

70 a. Die **absolute** oder **Zugfestigkeit**, d. i. der Widerstand, den ein Körper dem Zerreißen entgegensetzt, wenn er z. B. am oberen Ende befestigt und am unteren Ende belastet wird. Sie ist, vorausgesetzt daß das Gewicht des Stabes unberücksichtigt bleibt, unabhängig von der Gestalt und der Länge des Körpers, dagegen dem Querschnitte desselben direct proportional.

Wird also ein Stab z. B. 3mal so breit und 2mal so dick, so wird seine Zugfestigkeit $3 \times 2 = 6$mal so groß; kennt man die Zugfestigkeit eines Drahtes, so hat ein 5mal so dicker Draht von demselben Material die 25fache Festigkeit. Man hat daher aus den erwähnten Versuchen die Festigkeit für Körper von 1qmm Querschnitt berechnet und nennt dieselbe den **Coëfficienten der absoluten Festigkeit**. Der Coëfficient der absoluten Festigkeit ist demnach die Kraft, welche einen Stab von 1qmm Querschnitt eben zerreißt. Wie die Tabelle in 75. zeigt, beträgt derselbe für Eisendraht = 70kg; d. h. ein Eisendraht von 1qmm Querschnitt wird durch angehängte 70kg zerrissen. Die Tabelle zeigt auch, daß Gußstahl die größte Zugfestigkeit hat. Noch größer scheint indessen diejenige von Coconfäden und Spinnehfäden zu sein; denn ein Seil von 1qmm Querschnitt von diesen Fäden würde 500kg tragen können. Seile von organischen Fasern tragen um so weniger, je mehr sie gewunden sind, Seile von Eisendraht aber mehr als Eisenstäbe von gleicher Dicke. Baumwollfasern tragen 100—300g, Millionen mal ihr eigenes Gewicht. — Je größer die Zugfestigkeit im Verhältnisse zum Tragmodul ist, desto mehr lassen sich die Theilchen des Körpers jenseits der Elasticitätsgrenze verschieben, ohne den Zusammenhang einzubüßen, desto größer ist also die Zähigkeit.

Aufg. 85. Wie groß ist die Festigkeit eines Eisendrahtes von 3mm Durchmesser? Aufl.: $\frac{1}{4} \cdot 3^2 \cdot 3{,}14 \cdot 70 = 494{,}55$kg. — A. 86. Wie groß muß der Durchmesser eines Kupferdrahtes sein, der bei 6facher Sicherheit 100kg tragen soll? Aufl.: $\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{4} \cdot d^2\pi \cdot 40 = 100$; hieraus $d = 4{,}4$mm. — A. 87. Wenn ein Eisendraht von 1m Länge und 1mm Dicke im Wasser 6g wiegt, würde sich alsdann ein Telegraphenkabel an einer Meeresstelle von 12000m Tiefe beim Versenken selbst tragen können? Aufl.: 12000m Eisendraht wiegen $12000 \cdot 6 = 72000$g $= 72$kg. — Nun ist aber die absolute Festigkeit des Drahtes 40, höchstens 60kg; also würde das Kabel beim Versenken reißen. Könnte man vielleicht diesen Uebelstand durch dickere Drähte vermeiden? Oder auf andere Art?

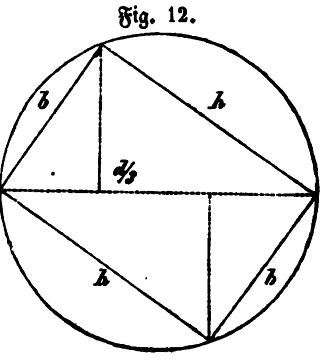
71 b. Die **relative** oder **Bruchfestigkeit** ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerbrechen entgegensetzt, wenn er z. B. am einen Ende befestigt und am anderen Ende belastet ist, oder wenn er an beiden Enden unterstützt und in der Mitte belastet ist. Sowohl die Theorie, als auch zahlreiche Versuche haben ergeben, daß die relative Festigkeit eines rechteckigen Balkens **direct proportional der Breite und dem Quadrat der Höhe, aber umgekehrt proportional der Länge ist.** Bei der zweiten Art der Belastung ist die Festigkeit 4mal so groß als bei der ersten Art, und in beiden Fällen wird die Festigkeit doppelt so groß, wenn die Last auf den ganzen Balken vertheilt ist. Bezeichnet

man mit l, b und h die Länge, Breite und Höhe des Balkens und mit f den Coëfficienten der absoluten Festigkeit, sodann mit r den Radius eines cylindrischen Balkens, so ist für die erste Belastungsart die relative Festigkeit des rechteckigen Balkens $Q = f/_6 \cdot bh^2 : l$, des cylindrischen $= f/_4 \cdot r^3\pi : l$.

Die erste dieser Formeln, deren Richtigkeit wir in der Lehre vom Trägheitsmoment zeigen werden, und deren die Mechanik eine große Zahl bedarf, enthält das obige Gesetz. Aus demselben folgt, daß die Festigkeit eines Balkens durch eine doppelte Breite nur zweimal, durch eine doppelte Höhe aber viermal so groß wird. Aus diesem Grunde werden die Brückenträger, Wagbalken u. s. w. hoch und schmal gebaut, es wird an allen auf relative Festigkeit beanspruchten Körpern die Hauptmasse in die Höhe, weit weg von der neutralen Faser gebracht; Tragschienen, Maschinentheile erhalten eine Tförmige oder doppelt Tförmige Gestalt; bei den Fischbauchträgern der Mainzer Brücke liegen die hauptsächlich tragenden Massen an den äußeren Rändern; hohle Knochen, hohle Balken tragen mehr als massive von demselben Material und Gewicht; ja Brücken erhalten sogar, wie die berühmte Brittania-Brücke von Stephenson und Fairbairn, eine Röhrenform mit einem Querschnitte von der Gestalt eines Quadrates, dessen oberste Seite die Hauptmasse in Zellen vertheilt erhält, während auf der untersten Seite die Eisenbahnzüge fahren.

72 Aufg. 88. Wie groß ist die relative Festigkeit einer gewalzten, schmiedeeisernen Schiene von 3cm Breite, 15cm Höhe und 6m Länge bei der ersten Belastungsart? Aufl.: Q = 1125kg. — A. 89. Wie groß muß der Radius eines hölzernen Balkens sein, wenn derselbe bei 5m Länge und 5 facher Sicherheit 282,744kg tragen soll? Aufl.: $Q = \frac{9}{5 \cdot 4} \cdot \frac{r^3 \cdot 3{,}1416}{5000}$; r = 100mm = 10cm. — A. 90. Wie groß muß die Höhe eines Trägers von Gußeisen sein, wenn derselbe 4m lang und 4cm breit ist und mit 30 facher Sicherheit $73^1/_3$kg bei der zweiten Belastungsart tragen soll? Aufl.: $Q = \frac{1}{10} \cdot \frac{2f}{3} \cdot \frac{bh^2}{3} = \frac{2 \cdot 11}{10 \cdot 3} \cdot \frac{40h^2}{4000} = \frac{220}{3}$; hieraus h = 10cm. — A. 91. Ein gußeiserner Balken von 1cm Höhe und 2cm Breite soll nach der zweiten Art durch sein eigenes Gewicht zerbrechen; wie lang muß er sein? Aufl.: Inhalt des Balkens $2l$ccm, Gewicht $= 2l \cdot 7$g. — Soll der Balken dieses Gewicht tragen, so muß seine relative Festigkeit nach der zweiten Art, doppelt genommen, jenem Gewichte gleich sein. Also $2 \cdot \frac{2f}{3} \cdot \frac{bh^2}{l} = 0{,}014\, l$, woraus $l = 14475$mm = 14m 475mm. Bei dieser Länge kann sich der Balken noch tragen; bei 15m Länge würde er unter seinem eigenen Gewichte brechen. — A. 92. Aus einem kreisrunden Balken soll ein rechteckiger geschnitten werden; in welchem Verhältnisse müssen Höhe und Breite desselben zu einander stehen, damit die Tragkraft desselben den größtmöglichen Werth erhalte? Aufl.: Die relative Festigkeit $f/6 \cdot bh^2 : l$ ist ein Maximum, wenn bh^2 ein Maximum ist, also auch wenn $b(d^2 - b^2) = x$ seinen größten Werth hat. Dies ist der Fall, wenn x abnimmt, sobald b um eine sehr kleine Größe k größer oder kleiner wird, wenn also die 2 Werthe x′ und x″, die man durch Substitution von b + k und b — k für b erhält, kleiner als x werden. Die zwei Werthe sind:

Fig. 12.



$x' = (b + k)[d^2 - (b + k)^2] = bd^2 + kd^2 - b^3 - 2kb^2 - k^2b - kb^2 - 2k^2b - k^3 = bd^2 - b^3 + kd^2 - 3kb^2 - 3k^2b - k^3$ oder

$x' = b(d^2 - b^2) + k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b + k)$. Ebenso

$x'' = (b - k)[d^2 - (b - k)^2] = bd^2 - kd^2 - b^3 + 2kb^2 - k^2b + kb^2 - 2k^2b + k^3 = bd^2 - b^3 - kd^2 + 3kb^2 - 3k^2b + k^3$ oder

$x'' = b(d^2 - b^2) - k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b - k)$

Subtrahiren wir von jedem dieser 2 ganz analogen Werthe den Werth $b(d^2 - b^2)$ von x, so erhalten wir die 2 Differenzen:

$x' - x = k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b + k)$ und $x'' - x = -k(d^2 - 3b^2) - k^2(3b - k)$.

Damit nun x ein Maximum sei, müssen diese beiden Differenzen negativ sein; dies ist nur dann durchgehends möglich, wenn der Theil $k(d^2 - 3b^2)$ verschwindet, wenn also $d^2 = 3b^2$ oder wenn $b = d/\sqrt{3}$; für $h = \sqrt{d^2 - b^2}$ ergibt sich dann $h = d\sqrt{2}/\sqrt{3}$. — Diese 2 Werthe zeigen, wie groß Breite und Höhe für den verlangten Zweck sein müssen, und daß deren Verhältniß sein muß $b : h = 1 : \sqrt{2}$. Geometrisch läßt sich dies construiren,

wenn man den Durchmesser in 3 gleiche Theile theilt und in einem Theilungspunkte ein Loth errichtet; der Endpunkt desselben ist der Zusammentreffpunkt von b und h.

73 Die rückwirkende oder Druck-Festigkeit ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerdrücken entgegensetzt. Zerdrückt wird ein Körper, wenn er mit einer Grundfläche aufliegt und auf die entgegengesetzte Grundfläche eine Belastung wirkt, und die Höhe des Körpers die Breite und Dicke nicht weit überragt. Die rückwirkende Festigkeit ist dann proportional dem Querschnitte. Die Tabelle in 75. gibt die Coëfficienten der rückwirkenden Festigkeit in kg für Körper von 1qmm Querschnitt. Bei Mauersteinen pflegt man nur 1/20 der Festigkeit in Anspruch zu nehmen, bei Holz 1/10, bei Eisen 1/5. Die Druck- und Zugfestigkeit stimmen in dem Grundgesetze überein, unterscheiden sich aber sehr, wie die Tabelle zeigt, in den Coëfficienten. So ist die absolute Festigkeit des Schmiedeeisens viel größer als die des Gußeisens, die rückwirkende Festigkeit des Schmiedeeisens aber viel kleiner als die des Gußeisens. — Ist die Länge sehr groß im Vergleiche zur Breite und Dicke, ist also der Körper stabförmig, so wird er durch eine aufgelegte Last nicht zerdrückt, sondern seitwärts ausgebogen und zerknickt. Diese Erscheinung ist zusammengesetzte Bruch- und Druckfestigkeit. Ebenso gibt es auch Erscheinungen der zusammengesetzten Biegungs- und Druckelasticität, der zusammengesetzten Biegungs- und Zugelasticität u. s. w. Die Schub- oder Abscheerungsfestigkeit des Schmiedeeisens ist wenig kleiner als die Zug- und Druckfestigkeit desselben, die des Tannenholzes nach der Richtung der Fasern ist 12kg per qcm.

74 Die Torsions- oder Drehungsfestigkeit ist der Widerstand, den ein Körper dem Zerwinden entgegensetzt, wenn er z. B. an beiden Enden von entgegengesetzten Kräften gedreht wird. Dieselbe ist bei einem cylindrischen Körper der dritten Potenz des Radius und bei einem quadratischen Körper der dritten Potenz der Querschnittseite proportional. Bei dem Bau der Radwellen muß die Torsion berücksichtigt werden; der Torsionswinkel darf nach Gerstner nicht 1/10° erreichen.

75 Tabelle über Elasticität und Festigkeit, in Kilogrammen für Körper von 1qmm Querschnitt.

Namen der Körper.	Tragmodul. (Elasticitätsgrenze.)	Elasticitäts-Modul.	Coëfficient der absoluten Festigkeit.	Coëfficient der rückwirkenden Festigkeit.	Specif. Gewicht.
Schmiedeeisen	15	20 000	40—70	40—70	7,79
Gußeisen, gegen Zug	7,5	10 000	11	—	7,21
Gußeisen, gegen Druck	15	10 000	—	70—100	7,21
Stahl	25	20 000	80	—	7,82
Gußstahl	5—65	30 000	100	—	7,91
Messing	5—13	10 000	50	110	8,39
Kupfer	2—12	12 000	30—70	70	8—9
Silber	3—11	7000	16—29	—	10,47
Gold	3—13	6000	10—27	—	19,3
Platin	15—26	17 000	25—35	—	22
Zink	3/4— 1	9600	12—15	—	7,2
Blei	1	500	2—5	—	11,35
Zinn	1/2	3000	3—5	—	7,29
Antimon	—	—	3/4	—	6,71
Wismuth	—	—	1	—	9,82
Marmor	1	2000	5	8—10	2,84
Kalkstein	—	650	4	1—14	2,65
Sandstein	—	—	1	0,2—2	2,45
Quarz	—	360	12	20	2,65
Basalt	—	—	9	12	2,55
Granit	—	—	8	10—17	2,75
Glas	—	90	1—3	—	2,6
Holz	2	1100	1—8	3—8	0,6—0,8
Fischbein	5	700	—	—	
Kautschuk	0,5	0,1	—	—	
Luft	mehr als 1	0,02			0,0013
Quecksilber					13,59

Anm. Die Unterschiede im Tragmodul sind so zu verstehen, daß die größere Zahl für das ausgezogene, die kleinere für das geglühte Metall gilt.

d. Die Adhäsion.

76 Die Adhäsion ist die Kraft, mit welcher die einander sehr nahe gebrachten Oberflächentheilchen getrennter Körper an einander haften. Sie muß um so größer sein, je größer die Zahl der sich berührenden Theilchen ist, je größer also die sich berührenden Flächen sind, und dann je weniger Zwischenräume zwischen den beiden Flächen bleiben, je glatter also dieselben sind.

Schleift man zwei Platten von Glas, Marmor, Messing oder anderem Metall sehr eben und schiebt sie über einander, nachdem man durch leichtes Anhauchen auch noch die letzten Unebenheiten erfüllt hat, so fällt es oft schwer, sie wieder von einander zu trennen. Man darf daher Spiegeltafeln nie unmittelbar auf einander legen. Doch ist die Adhäsion beim bloßen Aufeinanderlegen nicht so groß wie die Cohäsion, weil die Oberflächen niemals vollkommen eben sind, und eine dünne Luftschicht an jeder etwas älteren Oberfläche haftet.

Schabt man aber zwei Bleistücke vollkommen eben und preßt sie sofort zusammen, so haften sie so fest, wie wenn sie ursprünglich ein Stück gebildet hätten; denn hier hat man wegen der Weichheit des Bleies die Theilchen so zwischen einander gepreßt, daß die Adhäsion zur Cohäsion geworden ist. Dies ist sonst nur dann möglich, wenn man die Zwischenräume zweier frischen und darum luftschichtfreien Oberflächen ganz ausfüllt. Darauf beruhen viele gewöhnlichen Methoden, Körper in ein Ganzes zu verbinden. Beim Leimen z. B. füllt man die Poren und Vertiefungen zweier frischen Holzflächen mit dem flüssigen Leime, so daß kein leerer Zwischenraum bleibt und nach dem Trocknen Holz und Leim nur eine einzige feste Masse bilden. Zu solchen Operationen, wie Kitten, Leimen, Kleben, Löthen, Mauren u. s. w. ist daher immer nur eine flüssige oder wenigstens weiche, aber festwerdende Masse tauglich, welche zu den betreffenden Körpern Adhäsion hat. In solchen Fällen kann die Adhäsion des vielfach eingreifenden Bindemittels oft so groß sein, daß, wie bei altem Mauerwerk, wo auch noch ein chemisches Festwerden eintritt, die verbundenen Körper eher an anderen, vielleicht schwachen Stellen brechen als an den Bindestellen. Auch das Anhaften von Staub an Wänden, das Schreiben und Zeichnen mit Kreide, Bleistift und Griffeln, die Pastellmalerei u. s. w. beruhen auf der Adhäsion fester Körper. Doch sind diese Schriften leicht verwischbar, weil sie nur auf den obersten Oberflächentheilchen haften. Beim Schreiben mit Tinte, beim Malen mit flüssigen Farben u. s. w. dringt die Flüssigkeit nicht blos in die Vertiefungen, sondern auch in die Poren ein, nimmt die färbenden Theilchen mit und läßt dieselben beim Verdunsten dort zurück; daher haften solche Schriften und Zeichen fester. In ähnlicher Weise erklärt sich auch das Anhaften galvanischer Niederschläge beim galvanischen Vergolden und Versilbern, die Feuervergoldung und die Vergoldung auf nassem Wege. Aber auch das trockne Vergolden und alle anderen Metallüberzüge sind Wirkungen der Adhäsion, wie z. B. das Anhaften der Zinnquecksilberfolie an den gewöhnlichen Spiegeln.

Auch die Flüssigkeiten haben Adhäsion zu einander; bringt man getrennte Theile einer Flüssigkeit zusammen, so verdrängen sie die Zwischenluft und vereinigen sich in eine Masse; hier wird also die Adhäsion sogleich wieder zur Cohäsion; die Cohäsion der Flüssigkeiten stimmt daher nicht ganz mit der der festen Körper, und darum mag es gerechtfertigt sein, den von Frankenheim (1835) für sie gewählten Namen Synaphie (συν mit, ἡ ἁφή das Berühren) anzunehmen, und die Adhäsion der Flüssigkeiten gegen feste Körper mit Prosaphie zu bezeichnen. Die Prosaphie der Flüssigkeiten mißt man, indem man an das eine Ende eines Wagbalkens eine reine und ebene Platte des festen Körpers genau wagrecht hängt, das Gleichgewicht herstellt und sodann unter die Platte die Flüssigkeit in einem weiten Gefäße bis zur Berührung bringt. Endlich legt man auf die Wagschale Gewichte bis zum Abreißen; dieses Gewicht gibt die Größe der Prosaphie an. So findet man, daß selbst Quecksilber zu Glas Prosaphie besitzt; die Thatsache, daß an einem in Quecksilber eingetauchten Glasstabe kein Tropfen bleibt, ist kein Gegenbeweis; er zeigt nur, daß die Prosaphie kleiner ist als das Gewicht der Quecksilbertröpfchen. Durch die Wägeversuche erfährt man, daß die Prosaphie der Flüssigkeiten selbst gegen einen und denselben Körper höchst verschieden ist; deshalb verdrängen sich kleine Flüssigkeitsmassen auf einer Glasplatte.

Indessen erhält man bei den Wägeversuchen nur dann die Prosaphie, wenn an der Platte keine flüssige Schicht hängen bleibt, wenn die Platte nicht benetzt wird; von der Synaphie aber läßt sich dann behaupten, daß sie größer ist als die Prosaphie. Bleibt dagegen eine flüssige Schicht an der Platte hängen, so hat man nicht die Prosaphie, sondern die Synaphie gemessen, und von der Prosaphie läßt sich dann behaupten, daß sie größer als die Synaphie ist. Da sich für jede Flüssigkeit eine Platte finden läßt, welche von ersterer benetzt wird, z. B. für Wasser eine Glasplatte, für Quecksilber eine Zinkplatte, so kann man für jede Flüssigkeit die Synaphie auffinden. Von allen Flüssigkeiten hat nach Frankenheim das Wasser die größte Synaphie; sie beträgt 537 Milliontel Atmosphäre, während für das Quecksilber nach Fiebig (1861) nur die Zahl 425 gilt. Die kleinste Synaphie haben nach Scholz (1873) die zusammengesetzten Aetherarten und unter diesen der Schwefeläther, welchem etwa die Zahl 180 entspricht. Von großem Einflusse auf Synaphie und Prosaphie ist die Temperatur; beide nehmen bei wachsender Temperatur ab. — Je nachdem die Synaphie größer oder kleiner als die Prosaphie ist, finden beim Zusammenwirken von festen und flüssigen Körpern entgegengesetzte Erscheinungen statt, die wir in dem Kapitel von der Capillarität näher betrachten werden.

Daß Flüssigkeiten an einander adhäriren, sieht man schon an dem Zerfließen eines Wassertropfens auf Quecksilber, eines Oeltropfens auf Wasser; auch hier ist die Adhäsion wieder sehr verschieden und verdrängen sich daher kleine Partieen von Flüssigkeiten unter den seltsamsten Bewegungen. Wenn größere Massen starke Adhäsion zu einander haben, so durchdringen sie sich gegenseitig, die eine löst sich in der anderen. (Siehe die Diffusion der Flüssigkeiten und die Endosmose.) Ist ihre Adhäsion klein, kleiner als ihre Cohäsion, so mischen sie sich nicht, sondern ordnen sich nach ihrem specifischen Gewichte über einander. Ist dieses bei zwei Flüssigkeiten gleich groß, so bildet die kleinere Masse in der größeren eine Kugelgestalt, was wir in der Lehre von der Gestalt der Flüssigkeiten näher betrachten werden (Plateaus Versuch).

Luftförmige Körper adhäriren ebenfalls, doch nicht an einander, weil die Gastheilchen einander wegen ihrer heftigen fortschreitenden Bewegung abstoßen, aber an feste und flüssige Körper; daher bilden sie, besonders auf glatten und festen Körpern eine dichte, oft schwer zu beseitigende Schicht (siehe die Luftbilder), daher dringen sie in das Innere der festen und flüssigen Körper hinein, wobei sie von der raschen Bewegung ihrer Moleküle unterstützt werden; sie werden also von festen und flüssigen Körpern verschluckt oder absorbirt, manche in unglaublicher Menge, andere fast gar nicht. Holz in Wasser geworfen bedeckt sich mit Luftblasen; erwärmtes Wasser singt, weil unzählige Lufterschütterungen durch aufsteigende Bläschen entstehen. Bei dem Absorbiren werden wahrscheinlich (nach Graham 1867) die Gase flüssig; wie wäre es sonst auch denkbar, daß 1 Vol. Wasser 1000 Vol. Ammoniakgas aufnehmen könnte?

e. Die Schwere oder Schwerkraft.

77 Die Schwere ist die Kraft, mit welcher die Erde alle zu derselben gehörigen Körper anzieht. Diese Kraft hat ihren Sitz nicht in irgend einem bestimmten Punkte, sondern in jedem Atom der ganzen Erde. Ein Körper kann aber diesen unendlich vielen Anziehungen nicht folgen, er kann sich nicht gleichzeitig nach unendlich vielen Richtungen hin bewegen, sondern nur nach einer; diese Richtung muß eine solche Lage haben, daß der Körper nach keiner Seite hin eine größere Anziehung erfährt als nach den übrigen Seiten; und dieses ist nur dann der Fall, wenn die Richtung, welche der Körper einschlägt, von allen nur denkbaren Richtungen die mittlere ist, d. h. wenn der Körper sich nach dem Mittelpunkte der Erde hin bewegt. Die Wirkung der Schwerkraft besteht demnach darin, daß ein nicht unterstützter Körper sich nach dem Mittelpunkte der Erde hin bewegt, daß er nach dem Mittelpunkte der Erde hin fällt. Diese Richtung des Sinkens oder eines durch das Bleiloth beschwerten Fadens nennt man die senk-

rechte oder lothrechte (verticale) Richtung oder kurz das Loth; diejenige, welche mit dieser einen rechten Winkel bildet, heißt die wagrechte oder horizontale Richtung. Die senkrechte Richtung auf einem Pole macht mit derjenigen auf dem Aequator einen rechten Winkel, die senkrechten Richtungen der nicht weit von einander entfernten Orte schließen aber einen so kleinen Winkel ein, daß man denselben nicht durch Winkelmeßinstrumente messen kann, und daß man also jene beiden Richtungen als parallel ansehen darf.

Die Schwerkraft der Erde wirkt nach dem Gravitationsgesetze, steht also im *geraden* Verhältnisse zu den Massen des anziehenden und des angezogenen Körpers und im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung dieser Körper. Der zweite Theil dieses Gesetzes wurde auf folgende Weise gefunden:

Newton kam 1666 in seinem Heimathorte Woolsthorpe bei dem Anblicke eines fallenden Apfels auf die Idee einer Vergleichung desselben mit dem Monde; wenn, sagte er sich, der Apfel von der Erde angezogen wird, so muß auch der Mond angezogen werden und demnach ebenfalls nach der Erde hin fallen. Wirklich fällt auch der Mond nach der Erde hin; denn geschähe dies nicht, so müßte er nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen; und zwar, wenn der Mond M (Fig. 13) in einer Secunde den Weg MM″ auf seiner krummen Bahn zurücklegt, so müßte er ohne die Einwirkung der Erde, allein seiner Trägheit überlassen, nach M′ gekommen sein; folglich ist er in 1 Sec. um den Betrag M′M″ = Ma zur Erde hin gefallen. Die Größe dieses Weges ist leicht zu finden; denn Ma : MM″ = MM″ : Mb.

Fig. 13.

Nun ist Mb der Durchmesser der Mondbahn = 720 000 000^m; daher der Weg des Mondes in 1 Sec. $= \frac{720\,000\,000 \,.\, 3{,}1416}{28 \,.\, 24 \,.\, 60 \,.\, 60} = 1000^m$. Hieraus $Ma = M'M'' = \frac{M''M^2}{Mb} = \frac{1000 \,.\, 1000}{720\,000\,000} = \frac{1}{720} = \frac{5}{3600}{}^m$. Demnach fällt der Mond in jeder Secunde um $^5/_{3600}{}^m$ nach der Erde hin; wenn auf der Erdoberfläche ein Körper zu fallen beginnt, so durchfällt er in der ersten Secunde 5^m; folglich ist die Anziehung der Erde auf den Mond 3600 = 60^{2}mal kleiner als auf die Erdkörper. Nun ist aber der Mond 60mal weiter von dem Erdmittelpunkte entfernt als diese Körper; folglich steht die Anziehung im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entfernung. Dieses wichtige Resultat über das Gesetz der Schwere erhielt Newton nicht bei der ersten Rechnung, weil er den Halbmesser der Erde, den vorausgegangenen unvollkommenen Messungen gemäß viel zu klein angenommen hatte. Erst als nach Picards Gradmessung im Jahre 1682 eine richtigere Größe für den Halbmesser bekannt wurde, wiederholte er die Rechnung und fand so sein Gesetz bewiesen. Das Werk „Principia philosophiae naturalis mathematica, 1688“, das Grundbuch der neueren Astronomie, enthält diese Ableitung des Gesetzes.

78 Die Größe oder Intensität der Erdschwere wird gemessen durch die Hauptwirkung derselben, nämlich durch die Geschwindigkeit, die sie einem frei fallenden Körper in jeder Secunde ertheilt; dieselbe ist an der Erdoberfläche = 9,808^m, in runder Zahl = 10^m und wird als Maß der Gravitation der Erde ganz allgemein mit g bezeichnet. Aus dem Gravitationsgesetze ergeben sich folgende Sätze:

1. Im Mittelpunkte der Erde kann man sich die ganze Schwerkraft vereinigt denken. Denn alle Körper fallen nach dem Mittelpunkte der Erde zu; die Atome wirken also zusammen gerade so, als ob sie in dem Mittelpunkte vereinigt wären. Es wird daher häufig der Mittelpunkt der Erde als Sitz der Schwere bezeichnet.

2. Alle Körper sind an demselben Orte gleich schwer d. h. sie fallen im luftleeren Raume in gleicher Zeit durch gleiche Höhe. Zwar wird nach dem Gesetze eine größere Masse stärker angezogen als eine kleinere; 1000 Atome eines Körpers erfahren eine 1000mal so große Anziehung als ein Atom desselben Körpers. Eine 1000mal so große Masse erhält aber durch die 1000fache Kraft nur genau die-

aber unter allen Umständen unverändert bleibt. — A. 96. Wie groß ist die Acceleration des Jupitermondes, der 6000 M. vom Jupiter entfernt ist und sich in 42 Stunden um denselben dreht, gegen den Jupiter, und die des Jupiter gegen die Sonne, wenn die Entf. derselben vom Jupiter 108 Mill. M. beträgt? Aufl.: $0{,}4^m$ und $0{,}000125^m$. — A. 97. Hieraus die Masse des Jupiter zu finden? Sonnenmasse zu Jupiter $= 0{,}000125 . 1800^2 : 0{,}4 = 1000 : 1$. — A. 98. Wie groß ist die Schwerkraft auf dem Monde, wenn dessen Dm. 468 M. und seine Masse $^1/_{80}$ der Erdmasse ist? Aufl.: $(g : 80)\ (1720 : 468)^2 = {^1/_6}g$. — A. 99. Was wiegt ein Körper, der am Aeq. 200^{kg} wiegt, am Pole, und was in unserer Gegend, wo die Zunahme der Schwere c^a $^1/_{300}$ beträgt? Aufl.: 201, $200^2/_3{}^{kg}$. — A. 100. Ist dies mittels Gewichtswagen nachweisbar, oder mit Federwagen?

f. Die Gravitation oder Weltanziehung.

81 **Die Gravitation ist die Anziehung der Weltkörper gegen einander.** Schon Keppler hat es in seinem berühmten Werke über den Mars (**astronomia nova** *αἰτιολόγητος*, **tradita commentariis de motu stellae martis, 1609**) ausgesprochen, daß die Weltkörper ein Bestreben haben, sich einander zu nähern, daß dieses Bestreben die Ursache ihrer krummlinigen Bewegung um einander, die Ursache von Ebbe und Fluth u. s. w. sei. Ja, er sprach es auch schon aus, daß dieses Bestreben in geradem Verhältnisse mit der Masse und in umgekehrten Verhältnisse mit dem Quadrat der Entfernung stehe. Er hatte also das Gesetz der Gravitation schon erkannt, aber weder nachgewiesen, noch angewendet. Erst Newton gelang beides. Dieser zeigte zunächst, daß das Gravitationsgesetz für die Anziehung der Sonne gegen die Planeten gelte. Wäre nämlich die Anziehung der Sonne gegen die Planeten die einzige auf die Planeten wirkende Kraft, so müßten die Planeten in die Sonne stürzen; die Planeten haben aber, unbekannt woher, eine gewisse fortschreitende Bewegung, eine gewisse lebendige Kraft in sich; wäre diese allein vorhanden, so müßten die Planeten in gerader Linie ins Unendliche gehen. Durch das Zusammenwirken dieser beiden Kräfte, der Anziehung der Sonne und der lebendigen Kraft der Planeten, entsteht die Bahn derselben um die Sonne. In dieser Bahn kann ein Planet nur bleiben, wenn die Anziehung oder Gravitation der Sonne gleich ist der aus der lebendigen Kraft des Planeten hervorgehenden Centrifugalkraft derselben. Was daher für die Centrifugalkräfte zweier Planeten gilt, muß auch für die Gravitation derselben gegen die Sonne gelten. Da nun, wie Newton aus Kepplers Gesetzen fand, die Schwungkräfte der Planeten in umgekehrtem Verhältnisse zu den Quadraten ihrer Abstände von der Sonne stehen, so müssen auch die Gravitationen der Sonne gegen die Planeten in diesem Verhältnisse stehen. — Newton zeigte sodann nach 77., daß die Gravitation mit der Schwerkraft identisch sei, indem er die Geltung des Gravitationsgesetzes auch für diese nachwies. — Nach den Lehren der analytischen Mechanik kann bei der Geltung des Gravitationsgesetzes die Bahn eines Weltkörpers nur eine Ellipse, Parabel oder Hyperbel sein; und umgekehrt, wenn sich Weltkörper in eben solchen Linien um andere Weltkörper bewegen, die in den Brennpunkten jener Linien stehen, so muß zwischen den Weltkörpern das Gravitationsgesetz gelten. Daher gilt dieses Gesetz auch für die Kometen, ja sogar für die Sonnen oder Fixsterne, da man wenigstens bei den Doppel- und mehrfachen Sternen elliptische Bahnen wahrgenommen hat. Das Gravitationsgesetz ist demnach ein Weltgrundgesetz, die Gravitation eine Weltkraft.

Die Gravitation erklärt: 1. Die Bewegung eines Weltkörpers um einen anderen (s. 142). 2. Die Störungen oder Ablenkungen (Perturbationen) eines Weltkörpers aus seiner gesetzmäßigen Bahn (s. 566.). 3. Die Erscheinungen der Ebbe und Fluth (s. 586.) 4. Die Entdeckung des Planeten Neptun und die Vermuthung von intramercuriellen Planeten (s. 574. und 567.)

Die Gravitation ist wie die Schwerkraft gegenseitig; die Sonne zieht nicht blos die Erde an, sondern wird auch von der Erde mit ganz gleicher Kraft angezogen. Die Anziehung der Sonne wird aber auf die verhältnißmäßig kleine Erdmasse ausgeübt, die Anziehung der Erde aber vertheilt sich auf die ganze, ungeheure Sonnenmasse. Wenn sich nun auch wegen der gegenseitigen Anziehung die Erde nicht eigentlich um die Sonne, sondern beide um den Mittelpunkt dieser zwei Massen bewegen, so ist doch diese Bewegung der Sonne unmerklich und die der Erde außerordentlich groß, weil der Mittelpunkt der zwei Massen, der sogenannte Schwerpunkt, in die Sonne fällt.

2. Die Wärme.

82 Die Wärme ist diejenige Kraft, welche folgende drei Wirkungen ausübt, wenn sie in einen Körper eingeführt wird. 1. Sie erwärmt den Körper oder erhöht seine Temperatur; 2. sie dehnt den Körper aus oder vergrößert das Volumen desselben; 3. sie verändert den Aggregatzustand der Körper, d. h. sie macht feste Körper flüssig und flüssige Körper luftförmig. Die entgegengesetzten Wirkungen treten ein, wenn einem Körper Wärme entzogen wird. Es gibt zwei Arten von Wärme: strahlende Wärme und Körperwärme. Die strahlende Wärme ist diejenige, welche sich durch einen Körper und durch den Weltraum blitzschnell fortpflanzt, ohne denselben zu erwärmen. Sie geht von jedem Körper nach allen Richtungen in geraden Linien fort, die man Wärmestrahlen nennt, und kommt erst dann zur Wirkung, wenn sie von einem Körper aufgenommen und festgehalten, oder, wie man sich ausdrückt, absorbirt wird. Sie besteht ihrem inneren Wesen nach aus Schwingungen des Aethers, welche auf den Strahlen senkrecht stehen, und deren Zahl 50 bis 800 Billionen in der Secunde beträgt. Unter 400 Billionen machen diese Schwingungen keinen Eindruck auf das Auge, bestehen also nur aus dunkeln Strahlen; dagegen sind die wärmenden Wirkungen dieser Strahlen sehr bedeutend und so überwiegend, daß man Strahlen von jenen Schwingungszahlen als die eigentlichen Wärmestrahlen bezeichnen kann. Strahlen, deren Aetheratome aber mehr als 400 Billionen Schwingungen vollbringen, machen nur einen geringeren wärmenden, aber einen starken Lichteindruck; es sind die eigentlichen Lichtstrahlen. — Die Körperwärme besteht aus den schwingenden, wälzenden und fortschreitenden Bewegungen der kleinsten Körpertheilchen, wie sie in 18., 53. und 54. geschildert wurden; die lebendige Kraft dieser Bewegungen, welche wegen ihrer unendlichen Feinheit und Schnelligkeit sonst nicht wahrnehmbar sind, bedingt die Temperatur des Körpers. Es gibt keinen Körper ohne diese Bewegungen oder ohne Wärme; die Körperwärme wird erhöht, wenn auf den Körper heißere Wärmestrahlen fallen, als er selber aussendet, sodann wenn er mit einem wärmeren Körper in Berührung steht, weil dessen lebhaftere Molekularbewegung sich ihm dann mittheilen muß, und endlich, wenn ein Körper Arbeit in sich aufnimmt, ohne dieselbe wieder abzugeben oder zu innerer Arbeit zu verwenden. Der letzte Fall tritt durch Reibung und Stoß ein, weil dadurch die Theilchen in lebhafteres Zittern versetzt werden, und außerdem in allen Fällen, die mit einer Verminderung der Disgregation verbunden sind, also bei einem äußeren Drucke oder bei einer chemischen Verbindung. Umgekehrt entsteht eine Vermehrung der Disgregation, also eine Vergrößerung des Volumens, eine Aggregatzustandänderung, eine Lockerung der chemischen Verbindungen bis zur theilweisen Zersetzung oder Dissociation, oder gar bis zur totalen Zersetzung, wenn von einem Körper Wärme aufgenommen wird; denn hierdurch erhalten die Theilchen eine lebhaftere Bewegung, müssen sich daher weiter von einander entfernen. Näheres in der Lehre von der Wärme.

3. Das Licht.

83 Das Licht ist diejenige Kraft, welche einen Körper sichtbar macht, wenn es entweder von diesem Körper selbst ausgeht, oder auch, wenn es von einem anderen Körper demselben zugesendet und dann von demselben zurückgestrahlt wird. Das Licht besteht aus Schwingungen des Aethers, welche wenigstens die Zahl von 400 Billionen in der Secunde erreichen müssen. Solches Licht erscheint uns roth; die Farben ändern sich, wenn die Zahl der Schwingungen größer wird, und zwar folgen dieselben hinsichtlich der Schwingungszahl in folgender Ordnung auf einander: Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett; das violette Licht macht die meisten Schwingungen, 800 Billionen in der Secunde. Die Schwingungen des gewöhnlichen Lichtes stehen auf dem Lichtstrahle nach allen nur möglichen Richtungen senkrecht; sind diese Schwingungen einander parallel, so nennt man das Licht polarisirt. Die Hauptquelle des Lichtes auf Erden ist die Sonne; doch entsteht es auch in allen irdischen Körpern und wird von denselben ausgestrahlt, wenn dieselben über 500° erhitzt werden, und bei allen Verbrennungen, deren Temperatur über 500° hinausgeht. Auch Körper von niedriger Temperatur strahlen manchmal eigenes Licht aus, aber nur Licht von sehr geringer Stärke. Näheres in der Lehre vom Lichte oder der Optik.

4. Die Elektricität.

84 Die Elektricität ist die Kraft, welche einem Körper die Eigenschaft ertheilt: 1. leichte Körperchen anzuziehen und nach der Berührung wieder abzustoßen; 2. gegen einen genäherten Körper leuchtende, wärmende, knisternde oder knallende, stechende Funken auszustoßen. Die Elektricität kann man z. B. in einem Glasstabe hervorrufen, wenn man denselben mit einem Lederlappen reibt; sie entsteht aber alsdann nicht blos in dem Glasstabe, sondern auch in dem Lederlappen; beide werden, wie man sagt, elektrisch. Allein dasjenige Körperchen, welches von dem Glasstabe nach der Berührung abgestoßen wird, wird von dem Lederlappen angezogen; und umgekehrt, was von dem Lederlappen abgestoßen wird, wird von der Glasstange angezogen. Hieraus folgt, daß die Elektricität des Glasstabes und die des Lederlappens verschieden sind. Man kann nun auch in anderen Körpern durch Reibung Elektricität erzeugen, z. B. in einer Siegellackstange mit einem wollenen Lappen, in einer Hartkautschukplatte mit einem Pelzlappen u. s. w. — Macht man die Anziehungsversuche mit diesen Körpern, so ergibt sich, daß ein von der Glasstange berührtes leichtes Korkkügelchen von dieser, von dem wollenen Lappen und dem Pelzlappen abgestoßen, von dem Lederlappen, der Harzstange und der Kautschukplatte aber angezogen wird und umgekehrt. Hieraus folgt, daß die 3 ersten Körper eine Art, die 3 letztere eine andere Art von Elektricität enthalten. Aehnliche Versuche ergeben, daß es überhaupt nur zwei Arten von Elektricität gibt: Glas- oder positive Elektricität und Harz- oder negative Elektricität.

Diese zwei Arten von Elektricität befolgen das wichtige Grundgesetz: Gleichnamige Elektricitäten stoßen einander ab; ungleichnamige Elektricitäten ziehen einander an, und heben einander auf, wenn sie in gleicher Menge in einen Körper gebracht werden. Hieraus ergibt sich eine der wichtigsten Wirkungen eines elektrischen Körpers. Da nämlich gleiche Mengen entgegengesetzter Elektricitäten in einem Körper sich aufheben, also sich ebenso verhalten, wie wenn in dem Körper gar keine Elektricität vorhanden wäre, so kann man umgekehrt an-

nehmen, daß in jedem sogenannten unelektrischen Körper beide Elektricitäten in gleicher Menge vorhanden seien. Wird nun einem unelektrischen Körper ein elektrischer genähert, so zieht dieser die ungleichnamige Elektricität des ersteren in das benachbarte Ende desselben und stößt die gleichnamige in das entfernte Ende; man nennt diese Wirkung die Vertheilung oder Influenz. Auf derselben beruhen alle elektrischen Erscheinungen, z. B. der elektrische Funke. Nähert man den Finger *einem* positiv elektrischen Körper, so zieht dieser so lange negative Elektricität aus dem Körper in die Fingerspitze, bis die beiden Elektricitäten stark genug sind, den Widerstand der Luft zu überwinden und sich in der Luft zu vereinigen; der elektrische Funke ist also die Vereinigung der beiden entgegengesetzten Elektricitäten in der Luft. Geschieht diese Vereinigung in einem anderen Körper, so erfährt derselbe eine Erschütterung, die man den elektrischen Schlag nennt; derselbe wirkt erwärmend, zerstörend, erschütternd u. s. w. — Wenn die beiden Elektricitäten fortwährend von beiden Enden in einen Körper geleitet werden und sich fortwährend mit einander vereinigen, so nennt man dies einen elektrischen Strom. Dieser wirkt wie der Schlag, von dem er sich nur durch die Dauer unterscheidet, erschütternd, erwärmend, erleuchtend, zersetzend, magnetisirend u. s. w. Das Wesen der Elektricität ist noch ganz unbekannt; die Gesetze derselben können daher nicht durch Deduction, sondern nur durch Induction gefunden werden. Siehe die Lehre von der Elektricität.

5. Der Magnetismus.

85 Der Magnetismus ist eine vorzugsweise im Eisen erweckbare Kraft, welche diesem Eisen die Eigenschaft ertheilt, anderes Eisen besonders stark anzuziehen und bei freier Beweglichkeit eine bestimmte Lage anzunehmen. Ein Körper, der diese Eigenschaften hat, wird Magnet, der angezogene Körper magnetisch genannt. Nicht blos Eisen, sondern auch viele andere Körper werden, aber diese nur sehr schwach selbst von starken Magneten angezogen; die meisten der übrigen nicht angezogenen Körper werden abgestoßen. Die anziehbaren Körper nennt man paramagnetisch, die abstoßbaren diamagnetisch. Eisen, Nickel und Kobalt sind am stärksten paramagnetisch, Wismuth ist am stärksten diamagnetisch.

Wenn ein Magnet frei aufgehängt ist, so richtet er das eine Ende nach Norden, das andere Ende nach Süden; man nennt diese Enden entsprechend Nordpol und Südpol. Für die Wirkung zweier frei beweglichen Magnete gilt das magnetische Grundgesetz: Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an, ein Gesetz, das große Aehnlichkeit mit dem elektrischen Grundgesetze hat. Auch darin zeigt der Magnetismus Aehnlichkeit mit der Elektricität, daß er auf andere Körper in ganz gleicher Weise vertheilend oder influenzirend einwirkt. Der Magnetismus wird demnach hervorgerufen durch Einwirkung (Bestreichen) anderer Magnete; die stärksten Magnete aber entstehen dadurch, daß ein elektrischer Strom Eisen umkreist. Das Wesen des Magnetismus ist noch unbekannt; nach Ampères Theorie besteht derselbe aus parallelen elektrischen Strömen, die einen Magnetstab oder dessen Theilchen senkrecht zur Länge des Stabes umkreisen.

4. Allgemeine Sätze. Axiome.

86 Unter allgemeinen Sätzen, physikalischen Grundsätzen oder Axiomen verstehen wir solche Wahrheiten, welche sich nicht mehr aus anderen Wahrheiten ableiten lassen, deren Geltung aber stillschweigend oder ausdrücklich bei den physikalischen Folgerungen vorausgesetzt wird, gerade so, wie allen mathematischen Beweisen und Schlüssen eine Reihe von Axiomen zur Grundlage dient. Doch tritt zwischen den mathematischen und den physikalischen Axiomen sofort ein bedeutender Unterschied hervor: während man die ersteren längst anwandte, ehe man sie aussprach, und wohl Mancher sie noch jetzt anwendet, ohne sich über ihre Geltung Rechenschaft zu geben, sind die physikalischen Axiome ein Resultat langer Erfahrung, ein Ausfluß gereinigter Forschung; ja manche konnten erst nach langem Kampfe mit entgegengesetzten Anschauungen durchdringen, bei anderen wurde die vollständige Bedeutung erst spät, oder ist vielleicht jetzt noch nicht in ihrem ganzen Umfange erkannt. Außerdem sind die mathematischen Axiome Jedem verständlich, der nur die Grundbegriffe der Größenlehre kennt; die physikalischen Axiome dagegen kommen erst dann zur vollständigen Klarheit, wenn man das ganze Gebiet der Physik übersehen kann. Da wir nun in unserer Einleitung einen Ueberblick über dieses Gebiet zu gewinnen versucht haben, so können wir jetzt auch die Anführung der physikalischen Axiome vornehmen. Als Grundlage für dieselben und für die ganze physikalische Forschung gilt das Causalgesetz: Jede Wirkung, jede Veränderung muß eine Ursache haben. Unter Ursache wird hierbei nicht die Bedingung, sondern der zureichende Grund einer Wirkung verstanden, d. h. die Vorgänge, welche die Wirkung vollständig erklären; so ist z. B. die Ursache des Fallens eines aus unserer Hand losgelassenen Steines nicht das Loslassen, welches nur eine Bedingung ist, sondern die Anziehung der Erde. Die Ursachen der Veränderungen sind also dasjenige, was wir Kräfte nennen und für welche (nach Wundt) folgende 6 Axiome stattfinden:

87 1. **Alle Ursachen sind Bewegungsursachen.** Keine Kraft bringt irgend eine andere Wirkung hervor, als eine Bewegung; alle Veränderungen in der Natur sind nur Bewegungen, entweder der ganzen Körper, oder ihrer kleinsten Theilchen. Denn andere Veränderungen an Körpern, als Umwandlung des Stoffes oder Umwandlung der Lage der Theilchen oder des ganzen Körpers sind nicht denkbar. Stoffumwandlungen hat man früher für möglich gehalten; eine tausendjährige Erfahrung hat sie als unmöglich gezeigt; folglich können die Veränderungen nur in Bewegungen bestehen. Die neuere Physik kann dieses Axiom noch in dem weiteren Sinne fassen, daß nicht blos die Wirkung jeder Kraft, sondern auch die Kraft selbst in einer Bewegung beruhe; denn wir erzeugen ja häufig eine Kraft aus der anderen, also muß die erzeugte Kraft, weil sie eine Wirkung ist, Bewegung sein. Außerdem sehen wir aus jeder verschwindenden Bewegung eine gleichwerthige Bewegung hervorgehen, so daß keine einmal vorhandene Bewegung verschwinden kann. Gäbe es nun Kräfte, welche Bewegung erzeugten, ohne Bewegung zu sein, ohne also durch Abgeben von Bewegung eine solche zu erzeugen, so könnte die Summe der vorhandenen Bewegung vermehrt werden, sie müßte unter unseren Augen ins Unendliche zunehmen.

88 2. **Jede Bewegungsursache liegt außerhalb des Bewegten.** Ein sich vollkommen selbst überlassener Körper erfährt keine Veränderung; daß organische Körper, welche ganz abgeschlossen sind, sich dennoch zersetzen, ist kein schlagender Einwurf gegen diese Behauptung; denn ein organischer Körper besteht aus mehreren Körpern, die auf einander einwirken. Wenn wir demnach keine Veränderung finden ohne Einwirkung eines anderen Körpers, so muß jede Bewegungsursache außerhalb des Bewegten liegen. Es ist nur noch eine unentschiedene Frage, ob Wirkung blos bei unmittelbarer Berührung stattfinde, ob alle Wirkung demnach Stoßwirkung sei, wie Euler meinte, oder ob es auch eine Fernewirkung gebe. Zu dieser letzteren Annahme ist man durch die Fernewirkung der Attraction, des Magnetismus und der Elektricität seit Newton geneigt; indeß ist es wahrscheinlich, daß sich diese Wirkungen durch ein Zwischenmedium, den Aether, übertragen.

89 3. **Alle Bewegungsursachen (Kräfte) wirken in der geraden Verbindungslinie ihres Ausgangs- und ihres Angriffspunktes.** Wir sehen einen Stein in gerader Linie zur Erde fallen, ein Stück Eisen nähert sich in gerader Linie einem Magnet, ein elektrischer Körper stößt einen gleichnamig elektrischen in gerader Linie ab, alle krummlinigen Bewegungen erklären sich aus zwei oder mehreren geradlinigen, die in die Verbindungsgeraden zwischen Kraft und bewegten Körper fallen. So ergibt sich das dritte Axiom als Ausfluß tausendfältiger Erfahrung. Früher führte man für die geradlinige Wirkung den Grund an, die gerade Linie sei die einfachste; dieser Grund hat eben so wenig Gewicht, als derjenige der antiken und mittelalterlichen Forscher für die Kreisbewegung der Welten; dieselben fanden nämlich den Grund dieser Bewegungsform darin, daß der Kreis die vollkommenste Figur sei. — Aus dem dritten Axiom können wir zwei Folgerungen ziehen, die gewöhnlich ebenfalls als mechanische Axiome aufgestellt werden: a. Der Angriffspunkt einer Kraft kann in der Richtung desselben beliebig verlegt werden, vorausgesetzt, daß hiermit die Größe der Kraft nicht verändert wird; denn das zweite Element der Kraft, ihre Richtung wird durch jene Verlegung eben nach dem dritten Axiom nicht geändert. b. Zwei gleiche und gerade entgegengesetzte Kräfte, die auf einen Körper wirken, heben einander auf. Denn gleiche Kräfte sind solche, die in einer und derselben Masse gleiche Bewegung erzeugen; da diese Kräfte in einer Geraden wirken, so müssen auch die beiden von ihnen erzeugten Bewegungen in einer Geraden liegen; von diesen beiden gleichen, in einer Geraden liegenden Bewegungen geschieht die eine ebenso viel vorwärts als die andere rückwärts, weil die Kräfte entgegengesetzt sind; folglich gelangt der Körper wieder in seine Stelle. Es ist nun einerlei, ob die Bewegungen endlich oder unendlich klein seien; die Schlußwirkung ist in beiden Fällen, sowohl bei nach einander folgender, als bei gleichzeitiger Wirkung der beiden Kräfte, gleich Null. c. Wenn zwei gleiche Kräfte unter einem Winkel auf einen Körper wirken, so schlägt derselbe eine Richtung ein, die den Winkel halbirt; denn durch die erste Kraft wird er aus der Richtung der zweiten gedrängt und durch die zweite aus der Richtung der ersten. Weil die beiden Kräfte einander gleich sind, so muß demnach die Richtung des Körpers von den Richtungen der beiden Kräfte um gleichviel weggedrängt sein, also in der Mitte zwischen beiden Richtungen liegen.

90 4. **Die Wirkung jeder Ursache verharrt.** Dieses Axiom haben wir schon in etwas anderer Form unter dem Namen „das Gesetz der Trägheit" oder „das erste Gesetz der Mechanik" kennen gelernt und unter den „allgemeinen Eigenschaften" betrachtet; wir konnten aber gerade deßhalb, weil die Eigenschaft der Trägheit ein Axiom ist, dieselbe dort nicht aus dem Begriffe der Materie ableiten. Die allgemeinere Fassung, welche hier das Axiom hat, spricht zugleich aus, daß auch der Zustand der Ruhe ein Resultat vorhergegangener Wirkung ist, in denen der Körper verharrt. Dieselbe betont auch besonders, daß eine frühere Wirkung durch eine spätere wohl verändert, aber nicht vernichtet wird, daß also ganz gleiche Wirkungen sich summirt in einem Körper anhäufen. Von dem Gesetze der Trägheit in diesem Sinne haben wir schon öfter Anwendung gemacht, z. B. bei der Betrachtung der beschleunigten Bewegung und der Wirkung einer constanten Kraft. Bringt nämlich eine constante Kraft, wie z. B. die Schwere, in jeder Secunde in einem Körper eine und dieselbe Geschwindigkeit hervor, so wird die Geschwindigkeit in t Sec. t mal so groß als in 1 Sec., weil die früheren Geschwindigkeiten in dem Körper noch vorhanden sind, wenn die späteren dazu kommen. Man setzt indeß hierbei das zweite Newton'sche Gesetz der Mechanik voraus, daß nämlich eine Kraft auf einen bewegten Körper gerade so wirkt wie auf einen ruhenden; dies ist auch der Fall, wenn der Körper nicht etwa wie ein im fließenden Wasser schwimmender Körper der Wirkung der Kraft ausweicht. Sonst spricht für die Richtigkeit jener Voraussetzung vielfältige Erfahrung. Es bedarf zu irgend einer Arbeit auf einem fahrenden Dampfschiffe derselben Kraft wie auf ruhender Erde; es erfordert dieselbe Pulvermenge, nach Osten zu schießen, wie nach Westen u. s. w. Unter Geltung dieser Voraussetzung können wir aus dem vierten Axiome noch eine Folgerung ziehen, die man häufig zum Beweise des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte benutzt. Diese Folgerung heißt: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nach einander auf einen Körper wirken. Denn die Wirkung der ersten Kraft beharrt im letzten Falle, bis die zweite dazu kommt, welche dann dieselbe Wirkung ausübt, wie auf den Körper im Ruhezustande, und daher die Wirkung der ersten Kraft ebenso verändert, wie es bei gleichzeitiger Wirkung geschehen wäre.

91 5. **Jeder Wirkung entspricht eine gleiche Gegenwirkung** oder jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft (actio est par reactioni), das dritte Newton'sche Gesetz der Mechanik. Denn hat eine Kraft eine Zeit lang auf einen Körper gewirkt, so ist in dem Träger jener Kraft der zur Wirkung verbrauchte Kraftbetrag nicht mehr vorhanden, wurde also während des Vorganges aufgehoben; dieses Aufheben einer Kraft ist aber nur durch eine ganz gleiche und entgegengesetzte Gegenkraft möglich. Wenn wir so das fünfte Axiom

4. Allgemeine Sätze. Axiome.

86 Unter allgemeinen Sätzen, physikalischen Grundsätzen oder Axiomen verstehen wir solche Wahrheiten, welche sich nicht mehr aus anderen Wahrheiten ableiten lassen, deren Geltung aber stillschweigend oder ausdrücklich bei den physikalischen Folgerungen vorausgesetzt wird, gerade so, wie allen mathematischen Beweisen und Schlüssen eine Reihe von Axiomen zur Grundlage dient. Doch tritt zwischen den mathematischen und den physikalischen Axiomen sofort ein bedeutender Unterschied hervor: während man die ersteren längst anwandte, ehe man sie aussprach, und wohl Mancher sie noch jetzt anwendet, ohne sich über ihre Geltung Rechenschaft zu geben, sind die physikalischen Axiome ein Resultat langer Erfahrung, ein Ausfluß gereinigter Forschung; ja manche konnten erst nach langem Kampfe mit entgegengesetzten Anschauungen durchdringen, bei anderen wurde die vollständige Bedeutung erst spät, oder ist vielleicht jetzt noch nicht in ihrem ganzen Umfange erkannt. Außerdem sind die mathematischen Axiome Jedem verständlich, der nur die Grundbegriffe der Größenlehre kennt; die physikalischen Axiome dagegen kommen erst dann zur vollständigen Klarheit, wenn man das ganze Gebiet der Physik übersehen kann. Da wir nun in unserer Einleitung einen Ueberblick über dieses Gebiet zu gewinnen versucht haben, so können wir jetzt auch die Anführung der physikalischen Axiome vornehmen. Als Grundlage für dieselben und für die ganze physikalische Forschung gilt das Causalgesetz: Jede Wirkung, jede Veränderung muß eine Ursache haben. Unter Ursache wird hierbei nicht die Bedingung, sondern der zureichende Grund einer Wirkung verstanden, d. h. die Vorgänge, welche die Wirkung vollständig erklären; so ist z. B. die Ursache des Fallens eines aus unserer Hand losgelassenen Steines nicht das Loslassen, welches nur eine Bedingung ist, sondern die Anziehung der Erde. Die Ursachen der Veränderungen sind also dasjenige, was wir Kräfte nennen und für welche (nach Wundt) folgende 6 Axiome stattfinden:

87 1. **Alle Ursachen sind Bewegungsursachen.** Keine Kraft bringt irgend eine andere Wirkung hervor, als eine Bewegung; alle Veränderungen in der Natur sind nur Bewegungen, entweder der ganzen Körper, oder ihrer kleinsten Theilchen. Denn andere Veränderungen an Körpern, als Umwandlung des Stoffes oder Umwandlung der Lage der Theilchen oder des ganzen Körpers sind nicht denkbar. Stoffumwandlungen hat man früher für möglich gehalten; eine tausendjährige Erfahrung hat sie als unmöglich gezeigt; folglich können die Veränderungen nur in Bewegungen bestehen. Die neuere Physik kann dieses Axiom noch in dem weiteren Sinne fassen, daß nicht blos die Wirkung jeder Kraft, sondern auch die Kraft selbst in einer Bewegung beruhe; denn wir erzeugen ja häufig eine Kraft aus der anderen, also muß die erzeugte Kraft, weil sie eine Wirkung ist, Bewegung sein. Außerdem sehen wir aus jeder verschwindenden Bewegung eine gleichwerthige Bewegung hervorgehen, so daß keine einmal vorhandene Bewegung verschwinden kann. Gäbe es nun Kräfte, welche Bewegung erzeugten, ohne Bewegung zu sein, ohne also durch Abgeben von Bewegung eine solche zu erzeugen, so könnte die Summe der vorhandenen Bewegung vermehrt werden, sie müßte unter unseren Augen ins Unendliche zunehmen.

88 2. **Jede Bewegungsursache liegt außerhalb des Bewegten.** Ein sich vollkommen selbst überlassener Körper erfährt keine Veränderung; daß organische Körper, welche ganz abgeschlossen sind, sich dennoch zersetzen, ist kein schlagender Einwurf gegen diese Behauptung; denn ein organischer Körper besteht aus mehreren Körpern, die auf einander einwirken. Wenn wir demnach keine Veränderung finden ohne Einwirkung eines anderen Körpers, so muß jede Bewegungsursache außerhalb des Bewegten liegen. Es ist nur noch eine unentschiedene Frage, ob Wirkung blos bei unmittelbarer Berührung stattfinde, ob alle Wirkung demnach Stoßwirkung sei, wie Euler meinte, oder ob es auch eine Fernewirkung gebe. Zu dieser letzteren Annahme ist man durch die Fernewirkung der Attraction, des Magnetismus und der Elektricität seit Newton geneigt; indeß ist es wahrscheinlich, daß sich diese Wirkungen durch ein Zwischenmedium, den Aether, übertragen.

3. **Alle Bewegungsursachen (Kräfte) wirken in der geraden Verbindungslinie ihres Ausgangs- und ihres Angriffspunktes.** Wir sehen einen Stein in gerader Linie zur Erde fallen, ein Stück Eisen nähert sich in gerader Linie einem Magnet, ein elektrischer Körper stößt einen gleichnamig elektrischen in gerader Linie ab, alle krummlinigen Bewegungen erklären sich aus zwei oder mehreren geradlinigen, die in die Verbindungsgeraden zwischen Kraft und bewegten Körper fallen. So ergibt sich das dritte Axiom als Ausfluß tausendfältiger Erfahrung. Früher führte man für die geradlinige Wirkung den Grund an, die gerade Linie sei die einfachste; dieser Grund hat eben so wenig Gewicht, als derjenige der antiken und mittelalterlichen Forscher für die Kreisbewegung der Welten; dieselben fanden nämlich den Grund dieser Bewegungsform darin, daß der Kreis die vollkommenste Figur sei. — Aus dem dritten Axiom können wir zwei Folgerungen ziehen, die gewöhnlich ebenfalls als mechanische Axiome aufgestellt werden: a. Der Angriffspunkt einer Kraft kann in der Richtung desselben beliebig verlegt werden, vorausgesetzt, daß hiermit die Größe der Kraft nicht verändert wird; denn das zweite Element der Kraft, ihre Richtung wird durch jene Verlegung eben nach dem dritten Axiom nicht geändert. b. Zwei gleiche und gerade entgegengesetzte Kräfte, die auf einen Körper wirken, heben einander auf. Denn gleiche Kräfte sind solche, die in einer und derselben Masse gleiche Bewegung erzeugen; da diese Kräfte in e i n e r Geraden wirken, so müssen auch die beiden von ihnen erzeugten Bewegungen in e i n e r Geraden liegen; von diesen beiden gleichen, in einer Geraden liegenden Bewegungen geschieht die eine ebenso viel vorwärts als die andere rückwärts, weil die Kräfte entgegengesetzt sind; folglich gelangt der Körper wieder in seine Stelle. Es ist nun einerlei, ob die Bewegungen endlich oder unendlich klein seien; die Schlußwirkung ist in beiden Fällen, sowohl bei nach einander folgender, als bei gleichzeitiger Wirkung der beiden Kräfte, gleich Null. c. Wenn zwei gleiche Kräfte unter einem Winkel auf einen Körper wirken, so schlägt derselbe eine Richtung ein, die den Winkel halbirt; denn durch die erste Kraft wird er aus der Richtung der zweiten gedrängt und durch die zweite aus der Richtung der ersten. Weil die beiden Kräfte einander gleich sind, so muß demnach die Richtung des Körpers von den Richtungen der beiden Kräfte um gleichviel weggedrängt sein, also in der Mitte zwischen beiden Richtungen liegen. 89

4. **Die Wirkung jeder Ursache verharrt.** Dieses Axiom haben wir schon in etwas anderer Form unter dem Namen „das Gesetz der Trägheit" oder „das erste Gesetz der Mechanik" kennen gelernt und unter den „allgemeinen Eigenschaften" betrachtet; wir konnten aber gerade deßhalb, weil die Eigenschaft der Trägheit ein Axiom ist, dieselbe dort nicht aus dem Begriffe der Materie ableiten. Die allgemeinere Fassung, welche hier das Axiom hat, spricht zugleich aus, daß auch der Zustand der Ruhe ein Resultat vorhergegangener Wirkung ist, in denen der Körper verharrt. Dieselbe betont auch besonders, daß eine frühere Wirkung durch eine spätere wohl verändert, aber nicht vernichtet wird, daß also ganz gleiche Wirkungen sich summirt in einem Körper anhäufen. Von dem Gesetze der Trägheit in diesem Sinne haben wir schon öfter Anwendung gemacht, z. B. bei der Betrachtung der beschleunigten Bewegung und der Wirkung einer constanten Kraft. Bringt nämlich eine constante Kraft, wie z. B. die Schwere, in jeder Secunde in einem Körper eine und dieselbe Geschwindigkeit hervor, so wird die Geschwindigkeit in t Sec. t mal so groß als in 1 Sec., weil die früheren Geschwindigkeiten in dem Körper noch vorhanden sind, wenn die späteren dazu kommen. Man setzt indeß hierbei das zweite Newton'sche Gesetz der Mechanik voraus, daß nämlich eine Kraft auf einen bewegten Körper gerade so wirkt wie auf einen ruhenden; dies ist auch der Fall, wenn der Körper nicht etwa wie ein im fließenden Wasser schwimmender Körper der Wirkung der Kraft ausweicht. Sonst spricht für die Richtigkeit jener Voraussetzung vielfältige Erfahrung. Es bedarf zu irgend einer Arbeit auf einem fahrenden Dampfschiffe derselben Kraft wie auf ruhender Erde; es erfordert dieselbe Pulvermenge, nach Osten zu schießen, wie nach Westen u. s. w. Unter Geltung dieser Voraussetzung können wir aus dem vierten Axiome noch eine Folgerung ziehen, die man häufig zum Beweise des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte benutzt. Diese Folgerung heißt: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nach einander auf einen Körper wirken. Denn die Wirkung der ersten Kraft beharrt im letzten Falle, bis die zweite dazu kommt, welche dann dieselbe Wirkung ausübt, wie auf den Körper im Ruhezustande, und daher die Wirkung der ersten Kraft ebenso verändert, wie es bei gleichzeitiger Wirkung geschehen wäre. 90

5. **Jeder Wirkung entspricht eine gleiche Gegenwirkung** oder jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft (actio est par reactioni), das dritte Newton'sche Gesetz der Mechanik. Denn hat eine Kraft eine Zeit lang auf einen Körper gewirkt, so ist in dem Träger jener Kraft der zur Wirkung verbrauchte Kraftbetrag nicht mehr vorhanden, wurde also während des Vorganges aufgehoben; dieses Aufheben einer Kraft ist aber nur durch eine ganz gleiche und entgegengesetzte Gegenkraft möglich. Wenn wir so das fünfte Axiom 91

4. Allgemeine Sätze. Axiome.

86 Unter allgemeinen Sätzen, physikalischen Grundsätzen oder Axiomen verstehen wir solche Wahrheiten, welche sich nicht mehr aus anderen Wahrheiten ableiten lassen, deren Geltung aber stillschweigend oder ausdrücklich bei den physikalischen Folgerungen vorausgesetzt wird, gerade so, wie allen mathematischen Beweisen und Schlüssen eine Reihe von Axiomen zur Grundlage dient. Doch tritt zwischen den mathematischen und den physikalischen Axiomen sofort ein bedeutender Unterschied hervor: während man die ersteren längst anwandte, ehe man sie aussprach, und wohl Mancher sie noch jetzt anwendet, ohne sich über ihre Geltung Rechenschaft zu geben, sind die physikalischen Axiome ein Resultat langer Erfahrung, ein Ausfluß gereinigter Forschung; ja manche konnten erst nach langem Kampfe mit entgegengesetzten Anschauungen durchdringen, bei anderen wurde die vollständige Bedeutung erst spät, oder ist vielleicht jetzt noch nicht in ihrem ganzen Umfange erkannt. Außerdem sind die mathematischen Axiome Jedem verständlich, der nur die Grundbegriffe der Größenlehre kennt; die physikalischen Axiome dagegen kommen erst dann zur vollständigen Klarheit, wenn man das ganze Gebiet der Physik übersehen kann. Da wir nun in unserer Einleitung einen Ueberblick über dieses Gebiet zu gewinnen versucht haben, so können wir jetzt auch die Anführung der physikalischen Axiome vornehmen. Als Grundlage für dieselben und für die ganze physikalische Forschung gilt das Causalgesetz: Jede Wirkung, jede Veränderung muß eine Ursache haben. Unter Ursache wird hierbei nicht die Bedingung, sondern der zureichende Grund einer Wirkung verstanden, d. h. die Vorgänge, welche die Wirkung vollständig erklären; so ist z. B. die Ursache des Fallens eines aus unserer Hand losgelassenen Steines nicht das Loslassen, welches nur eine Bedingung ist, sondern die Anziehung der Erde. Die Ursachen der Veränderungen sind also dasjenige, was wir Kräfte nennen und für welche (nach Wundt) folgende 6 Axiome stattfinden:

87 1. **Alle Ursachen sind Bewegungsursachen.** Keine Kraft bringt irgend eine andere Wirkung hervor, als eine Bewegung; alle Veränderungen in der Natur sind nur Bewegungen, entweder der ganzen Körper, oder ihrer kleinsten Theilchen. Denn andere Veränderungen an Körpern, als Umwandlung des Stoffes oder Umwandlung der Lage der Theilchen oder des ganzen Körpers sind nicht denkbar. Stoffumwandlungen hat man früher für möglich gehalten; eine tausendjährige Erfahrung hat sie als unmöglich gezeigt; folglich können die Veränderungen nur in Bewegungen bestehen. Die neuere Physik kann dieses Axiom noch in dem weiteren Sinne fassen, daß nicht blos die Wirkung jeder Kraft, sondern auch die Kraft selbst in einer Bewegung beruhe; denn wir erzeugen ja häufig eine Kraft aus der anderen, also muß die erzeugte Kraft, weil sie eine Wirkung ist, Bewegung sein. Außerdem sehen wir aus jeder verschwindenden Bewegung eine gleichwerthige Bewegung hervorgehen, so daß keine einmal vorhandene Bewegung verschwinden kann. Gäbe es nun Kräfte, welche Bewegung erzeugten, ohne Bewegung zu sein, ohne also durch Abgeben von Bewegung eine solche zu erzeugen, so könnte die Summe der vorhandenen Bewegung vermehrt werden, sie müßte unter unseren Augen ins Unendliche zunehmen.

88 2. **Jede Bewegungsursache liegt außerhalb des Bewegten.** Ein sich vollkommen selbst überlassener Körper erfährt keine Veränderung; daß organische Körper, welche ganz abgeschlossen sind, sich dennoch zersetzen, ist kein schlagender Einwurf gegen diese Behauptung; denn ein organischer Körper besteht aus mehreren Körpern, die auf einander einwirken. Wenn wir demnach keine Veränderung finden ohne Einwirkung eines anderen Körpers, so muß jede Bewegungsursache außerhalb des Bewegten liegen. Es ist nur noch eine unentschiedene Frage, ob Wirkung blos bei unmittelbarer Berührung stattfinde, ob alle Wirkung demnach Stoßwirkung sei, wie Euler meinte, oder ob es auch eine Fernewirkung gebe. Zu dieser letzteren Annahme ist man durch die Fernewirkung der Attraction, des Magnetismus und der Elektricität seit Newton geneigt; indeß ist es wahrscheinlich, daß sich diese Wirkungen durch ein Zwischenmedium, den Aether, übertragen.

3. **Alle Bewegungsursachen (Kräfte) wirken in der geraden Verbindungslinie ihres Ausgangs- und ihres Angriffspunktes.** Wir sehen einen Stein in gerader Linie zur Erde fallen, ein Stück Eisen nähert sich in gerader Linie einem Magnet, ein elektrischer Körper stößt einen gleichnamig elektrischen in gerader Linie ab, alle krummlinigen Bewegungen erklären sich aus zwei oder mehreren geradlinigen, die in die Verbindungsgeraden zwischen Kraft und bewegten Körper fallen. So ergibt sich das dritte Axiom als Ausfluß tausendfältiger Erfahrung. Früher führte man für die geradlinige Wirkung den Grund an, die gerade Linie sei die einfachste; dieser Grund hat eben so wenig Gewicht, als derjenige der antiken und mittelalterlichen Forscher für die Kreisbewegung der Welten; dieselben fanden nämlich den Grund dieser Bewegungsform darin, daß der Kreis die vollkommenste Figur sei. — Aus dem dritten Axiom können wir zwei Folgerungen ziehen, die gewöhnlich ebenfalls als mechanische Axiome aufgestellt werden: a. Der Angriffspunkt einer Kraft kann in der Richtung desselben beliebig verlegt werden, vorausgesetzt, daß hiermit die Größe der Kraft nicht verändert wird; denn das zweite Element der Kraft, ihre Richtung wird durch jene Verlegung eben nach dem dritten Axiom nicht geändert. b. Zwei gleiche und gerade entgegengesetzte Kräfte, die auf einen Körper wirken, heben einander auf. Denn gleiche Kräfte sind solche, die in einer und derselben Masse gleiche Bewegung erzeugen; da diese Kräfte in e i n e r Geraden wirken, so müssen auch die beiden von ihnen erzeugten Bewegungen in e i n e r Geraden liegen; von diesen beiden gleichen, in einer Geraden liegenden Bewegungen geschieht die eine ebenso viel vorwärts als die andere rückwärts, weil die Kräfte entgegengesetzt sind; folglich gelangt der Körper wieder in seine Stelle. Es ist nun einerlei, ob die Bewegungen endlich oder unendlich klein seien; die Schlußwirkung ist in beiden Fällen, sowohl bei nach einander folgender, als bei gleichzeitiger Wirkung der beiden Kräfte, gleich Null. c. Wenn zwei gleiche Kräfte unter einem Winkel auf einen Körper wirken, so schlägt derselbe eine Richtung ein, die den Winkel halbirt; denn durch die erste Kraft wird er aus der Richtung der zweiten gedrängt und durch die zweite aus der Richtung der ersten. Weil die beiden Kräfte einander gleich sind, so muß demnach die Richtung des Körpers von den Richtungen der beiden Kräfte um gleichviel weggedrängt sein, also in der Mitte zwischen beiden Richtungen liegen. 89

4. **Die Wirkung jeder Ursache verharrt.** Dieses Axiom haben wir schon in etwas anderer Form unter dem Namen „das Gesetz der Trägheit" oder „das erste Gesetz der Mechanik" kennen gelernt und unter den „allgemeinen Eigenschaften" betrachtet; wir konnten aber gerade deßhalb, weil die Eigenschaft der Trägheit ein Axiom ist, dieselbe dort nicht aus dem Begriffe der Materie ableiten. Die allgemeinere Fassung, welche hier das Axiom hat, spricht zugleich aus, daß auch der Zustand der Ruhe ein Resultat vorhergegangener Wirkung ist, in denen der Körper verharrt. Dieselbe betont auch besonders, daß eine frühere Wirkung durch eine spätere wohl verändert, aber nicht vernichtet wird, daß also ganz gleiche Wirkungen sich summirt in einem Körper anhäufen. Von dem Gesetze der Trägheit in diesem Sinne haben wir schon öfter Anwendung gemacht, z. B. bei der Betrachtung der beschleunigten Bewegung und der Wirkung einer constanten Kraft. Bringt nämlich eine constante Kraft, wie z. B. die Schwere, in jeder Secunde in einem Körper eine und dieselbe Geschwindigkeit hervor, so wird die Geschwindigkeit in t Sec. t mal so groß als in 1 Sec., weil die früheren Geschwindigkeiten in dem Körper noch vorhanden sind, wenn die späteren dazu kommen. Man setzt indeß hierbei das zweite Newton'sche Gesetz der Mechanik voraus, daß nämlich eine Kraft auf einen bewegten Körper gerade so wirkt wie auf einen ruhenden; dies ist auch der Fall, wenn der Körper nicht etwa wie ein im fließenden Wasser schwimmender Körper der Wirkung der Kraft ausweicht. Sonst spricht für die Richtigkeit jener Voraussetzung vielfältige Erfahrung. Es bedarf zu irgend einer Arbeit auf einem fahrenden Dampfschiffe derselben Kraft wie auf ruhender Erde; es erfordert dieselbe Pulvermenge, nach Osten zu schießen, wie nach Westen u. s. w. Unter Geltung dieser Voraussetzung können wir aus dem vierten Axiome noch eine Folgerung ziehen, die man häufig zum Beweise des Satzes vom Parallelogramm der Kräfte benutzt. Diese Folgerung heißt: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nach einander auf einen Körper wirken. Denn die Wirkung der ersten Kraft beharrt im letzten Falle, bis die zweite dazu kommt, welche dann dieselbe Wirkung ausübt, wie auf den Körper im Ruhezustande, und daher die Wirkung der ersten Kraft ebenso verändert, wie es bei gleichzeitiger Wirkung geschehen wäre. 90

5. **Jeder Wirkung entspricht eine gleiche Gegenwirkung** oder jeder Kraft entspricht eine gleiche Gegenkraft (actio est par reactioni), das dritte Newton'sche Gesetz der Mechanik. Denn hat eine Kraft eine Zeit lang auf einen Körper gewirkt, so ist in dem Träger jener Kraft der zur Wirkung verbrauchte Kraftbetrag nicht mehr vorhanden, wurde also während des Vorganges aufgehoben; dieses Aufheben einer Kraft ist aber nur durch eine ganz gleiche und entgegengesetzte Gegenkraft möglich. Wenn wir so das fünfte Axiom 91

aus einer Folgerung des dritten ableiten, so spricht doch auch alle Erfahrung für dasselbe. Stoßen wir heftig wider eine Wand, so erhalten wir einen ebenso starken Rückstoß; durch diesen Rückdruck bewegen wir z. B. mittels einer gegen den Boden gedrückten Stange einen Kahn, einen Schlitten. Ziehen wir an einem Seile, so hält uns dies mit ebenso großer Kraft fest: denn wir fallen zu Boden, wenn das Seil reißt. Ein Magnet zieht Eisen an, wird aber auch von dem Eisen angezogen. Zusammengepreßte Luft schiebt den Kolben wieder in die alte Stellung zurück. Das Axiom besagt also nicht blos, daß zur Aufhebung eines gewissen Widerstandes eine gleiche Kraft nöthig ist, sondern daß niemals eine isolirte Wirkung stattfindet, daß alle Kräfte gegenseitig sind.

92 6. **Jede Wirkung ist äquivalent ihrer Ursache** (causa aequat effectum), d. h. jede Kraft bringt eine Wirkung hervor, die wieder eine ebenso große Wirkung erzeugen kann wie jene Kraft, und daher selbst eine ebenso große Kraft ist; oder Kraft kann durch Wirkung nicht vernichtet, sondern nur verwandelt, und ebenso wenig aus nichts erschaffen werden. Wir haben dieses Axiom schon kennen gelernt als „das Princip von der Erhaltung der Kraft", und haben dasselbe ausführlich zu beweisen und an vielen Beispielen zu erhellen gesucht, weil dasselbe vielfach der gewöhnlichen Erfahrung zu widersprechen scheint und daher auch das neueste der Axiome ist; es hat erst durch die genauen Versuche von Joule und Hirn über die Verwandlung von Arbeit in Wärme und von Wärme in Arbeit in unseren Tagen seinen bestimmtesten Erfahrungsnachweis erhalten. (Siehe 35.—37.)

Erster Theil der Physik.

Die Lehre von der Körperbewegung oder die Mechanik.

Erste Abtheilung.

Die Mechanik der festen Körper oder die allgemeine Mechanik.

1. Die Lehre vom Gleichgewichte oder die Statik.

Das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten (Johann Bernoulli 1757). Eine Veränderung wird an einem Körper nur hervorgebracht, wenn Kräfte auf denselben einwirken. Doch können auch Kräfte auf einen Körper wirken, ohne eine Veränderung zu erzielen; man sagt dann: die Kräfte sind im Gleichgewichte. Kräfte sind also im Gleichgewichte, wenn sie keine Veränderung an dem Körper hervorbringen, auf welchen sie wirken. Der Körper kann sich hierbei im Zustande der Ruhe oder im Zustande der Bewegung befinden. Wenn ein Körper in Bewegung ist, und wenn die auf ihn wirkenden Kräfte im Gleichgewichte sind, so geht er nach dem Gesetze der Trägheit mit unveränderter Bewegung weiter. 93

Das Gleichgewicht der Kräfte kommt besonders bei den Maschinen zur Anwendung; wenn die bewegenden Kräfte an einer Maschine mit den Widerständen im Gleichgewichte sind, so ist die Maschine im Beharrungszustande, sie arbeitet ungestört weiter. Ein Eisenbahnzug z. B. oder ein Dampfschiff läuft mit derselben Geschwindigkeit weiter, wenn die Dampfmaschinenkraft jeden Moment im Gleichgewichte ist mit der Reibung, dem Widerstande der Luft, des Wassers u. s. w. Ist die Wirkung der Dampfmaschine größer als die Wirkung der Widerstände, wie dies im Anlaufe der Fall sein muß, so nimmt die Geschwindigkeit zu; ist aber die Wirkung der Widerstände überwiegend, so nimmt die Geschwindigkeit ab, ein Fall, der insbesondere beim Endlaufe eintritt. Der Beharrungszustand oder Fortlauf einer Maschine ist aber der Zweck derselben; folglich ist das Gleichgewicht an bewegten Körpern wichtiger als an ruhenden. Es wird daher auch richtiger sein, die Gesetze des Gleichgewichtes an bewegten Körpern zu finden, als, wie es gewöhnlich geschieht, an ruhenden.

Eine bewegte Masse geht mit unveränderter Geschwindigkeit fort, wenn keine Vermehrung oder Verminderung der lebendigen Kraft stattfindet. Dies ist nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft nur dann möglich, wenn die von Kräften producirte Arbeit immer durch die Gegenwirkung anderer Kräfte consumirt wird, wenn also die producirte Arbeit der von Gegenkräften, von Widerständen, von einer Last consumirten Arbeit gleich ist. Denn müßte, um Gleichgewicht hervorzubringen, die producirte Arbeit größer sein als die consumirte, so würde der Ueberschuß der producirten Arbeit verzehrt, ohne eine Wirkung hervorzubringen, es wäre Arbeit vernichtet, was dem Princip widerspricht; und wenn die producirte Arbeit kleiner wäre als die consumirte, so wäre der Ueberschuß der consumirten Arbeit neu entstanden, es wäre Arbeit aus nichts erschaffen, was ebenfalls dem Princip widerspricht; folglich ist die producirte Arbeit im Falle des Gleichgewichtes gleich der consumirten Arbeit. Arbeit ist aber das

Product der Kraft mit dem durch ihren Angriffspunkt in der Kraftrichtung zurückgelegten Wege. Man muß demnach, um die Bedingungen des Gleichgewichtes zu finden, die Wege aufsuchen, welche die Angriffspunkte unter dem Einflusse dieser Kräfte in den Richtungen derselben zurücklegen würden; man muß sodann diese Kräfte mit den Wegen multipliciren, und die so erhaltenen Arbeiten der gegen einander wirkenden Kräfte einander gleich setzen. Die entstehende Gleichung ist die gesuchte Bedingung des Gleichgewichtes. Diese gilt dann nothwendig auch für den Zustand der Ruhe; denn dieser Zustand ist ja nach der neueren Physik nur das Resultat fortdauernder entgegengesetzter, aber unendlich kleiner Bewegung; die eine Kraft oder Summe von Kräften bewegt den Körper in jedem Augenblicke um ebenso viel nach der einen Richtung, als ihn die andere Kraft oder Kraftsumme nach der entgegengesetzten Richtung bewegt. Dieses ist wiederum nur möglich, wenn die Arbeit der einen Kraft gleich ist der Arbeit der anderen Kraft. Um aber diese Arbeiten zu finden, muß man dem Körper in Gedanken eine durch die Kräfte erzeugbare, unendlich klein zu denkende Bewegung ertheilen, die Wege der Angriffspunkte in den Richtungen der Kräfte aufsuchen aus dem geometrischen Zusammenhange des Körpers und der Kräfte, und dann die Producte der Wege mit den Kräften einander gleichsetzen. Dieses Verfahren stimmt ganz mit dem für bewegte Körper überein. Man hat dasselbe zuerst für ruhende Körper angewandt und die unendlich kleinen Wege „virtuelle Geschwindigkeiten" genannt; daher heißt man diese allgemeine Gleichgewichtsbedingung das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten. Man kann dasselbe so aussprechen: Wenn Kräfte an einem ruhenden oder bewegten Systeme im Gleichgewichte sind, so muß die Summe der Arbeiten, welche während eines beliebigen Zeittheilchens von den nach einer Richtung wirkenden Kräften geleistet werden, gleich sein der Summe der Arbeiten, welche von den nach der anderen Richtung wirkenden Kräften in demselben Zeittheilchen geleistet werden, oder die algebraische Summe aller Arbeiten muß gleich Null sein. Dieser Satz ist die allgemeine Gleichgewichtsbedingung.

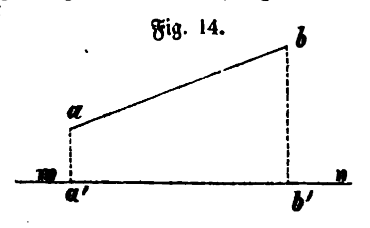
94 **Gleichgewicht an Maschinen.** Eine Maschine ist eine Verbindung widerstandsfähiger Körper, welche so eingerichtet ist, daß mittels ihrer mechanische Naturkräfte genöthigt werden können, unter bestimmten Bewegungen zu wirken (Definition von Reuleaux, theoretische Kinematik). Fassen wir der Einfachheit wegen zunächst den Fall ins Auge, daß mittels der Maschine nur eine Naturkraft wirksam werden solle; das Wirken einer Naturkraft mittels einer Maschine besteht gewöhnlich in der Ueberwindung eines Widerstandes; wir wollen denselben kurzweg mit Last (Q) bezeichnen und den Druck oder Zug, den die wirksame Naturkraft ausübt, kurzweg mit Kraft (P). Der Zweck der Maschine ist gewöhnlich der Beharrungszustand, d. i. der Zustand, in welchem die Maschine mit unveränderter Geschwindigkeit weiter läuft, in welchem also Kraft und Last im Gleichgewichte sind; dieser Zustand ist nach dem Princip der virtuellen Geschwindigkeiten erreicht, wenn die Arbeit der Kraft ebenso groß ist als die Arbeit der Last. An einer Maschine ist Gleichgewicht, wenn die Arbeit der Kraft gleich ist der Arbeit der Last.

Bezeichnen wir die Wege der Angriffspunkte von Kraft und Last mit s und s', so ist diese Bedingung durch die Gleichung ausgedrückt $Ps = Qs'$, woraus sich ergibt $P : Q = s' : s$, d. h. die Kraft verhält sich zur Last umgekehrt wie die Wege der Angriffspunkte. Hat demnach die Maschine eine solche Einrichtung, daß die Last nur einen sehr kleinen, die Kraft aber einen großen Weg zurücklegt, so ist s' sehr klein gegen s; folglich muß auch P in demselben Verhältnisse sehr klein

gegen Q sein. Man kann folglich durch eine Maschine mit einer sehr kleinen Kraft eine sehr große Last überwinden; es muß aber dann die Kraft einen sehr großen Weg zurücklegen, während die Last nur um sehr wenig fortbewegt wird. So viel durch eine Maschine an Kraft gewonnen wird, ebenso viel geht an Weg oder Zeit verloren. Man nennt diesen Satz die goldene Regel der Mechanik; er zeigt, dem Princip der Erhaltung der Kraft entsprechend, daß durch alle menschlichen Erfindungen Arbeit nicht aus nichts erschaffen werden kann; doch schränkt er die Wichtigkeit der Maschinen nicht ein; denn es schadet nichts, wenn große Wirkungen auch lange Zeit brauchen, wenn sie nur überhaupt geleistet werden.

Durch die Einrichtung einer Maschine kann und muß es vorkommen, daß der Angriffspunkt einer Kraft sich in einer anderen Richtung bewegt als in der Richtung der Kraft selbst. Die Arbeit aber ist das Product der Kraft mit dem Wege, den der Angriffspunkt oder der bewegte Körper in der Richtung der Kraft zurücklegt, weil eben die Wirkung der Kraft in ihrer eigenen Richtung stattfindet. Man muß folglich bei der Anwendung des Princips der virtuellen Geschwindigkeiten auf Maschinen von den wirklichen Wegen übergehen zu den in der Richtung der Kräfte zurückgelegten Wegen. Diese letzteren sind die Projectionen der ersteren auf die Richtungen der Kräfte; denn wurde z. B. der Punkt a (Fig. 14) durch die Maschine gezwungen, in der Richtung a b den Weg a b zurück zu legen, während die auf ihn wirkende Kraft die Richtung m n hat, so legt der Punkt in dieser Richtung den durch die 2 Lothe a a′ und b b′ begrenzten Weg a′ b′ zurück, den man bekanntermaßen die Projection von a b auf m n nennt.

Fig. 14.



Da die Arbeit der Last gewöhnlich von anderer Form ist als die der Kraft, da also die Maschinen häufig eine Verwandlung von Energie vollbringen, so hat man in der letzten Zeit auch den Satz ausgesprochen: Die Maschinen dienen zu Verwandlungen der Energie.

Die Widerstände. Die Widerstände oder Lasten, welche durch eine Kraft mittels einer Maschine überwunden werden sollen, sind Kräfte, welche der wirkenden Kraft entgegenwirken, sie sind Gegenkräfte. Wenn z. B. ein Körper gehoben werden soll, so ist sein Gewicht die Gegenkraft. Wenn ein Körper zerkleinert werden soll, wie beim Sägen, Schneiden, Hobeln, Feilen u. s. w. geschieht, so ist seine auf der Cohäsion beruhende Festigkeit die Gegenkraft. Wenn ein vollkommen freier Körper bewegt werden soll, so muß seine Trägheit überwunden werden; manche Forscher haben aus diesem Grunde die Trägheit eine Kraft (vis inertiae) genannt; das Maß dieser Kraft wäre die zur Ueberwindung der Trägheit nöthige Arbeit, also die lebendige Kraft, welche der bewegte Körper gewonnen hat. Wenn ein Körper auf einem anderen fortbewegt werden soll, so ist ein Widerstand, eine Kraft zu überwinden, die man Reibung nennt. Wenn ein Körper inmitten eines anderen, z. B. durch Luft oder Wasser, fortbewegt werden soll, so tritt eine Kraft entgegen, die man Widerstand des Mediums nennt. Wenn eine Bewegung durch widerstandsfähige, aber biegsame Körper, z. B. durch Seile oder Riemen auf andere Körper übertragen werden soll, so tritt durch die Cohäsion der Seile oder Riemen eine Gegenkraft auf, die man die Steifigkeit der Seile nennt. Bei den drei letzten Widerständen, die man auch Hindernisse der Bewegung nennt, wollen wir noch ein wenig verweilen. 95

1. Die Reibung hat einen sehr zusammengesetzten Ursprung; die Adhäsion der sich berührenden Oberflächentheile, die Festigkeit und die Elasticität der Hervorragungen. Vermöge der Adhäsion ziehen die Oberflächentheilchen sich gegenseitig nach, kehren dann um, gerathen in Schwingungen und verwandeln so einen Theil der wirksamen Arbeit in lebendige Kraft, in Wärme; dasselbe geschieht vermöge der Elasticität an den hervorragenden Theilchen, oder wenn der eine Körper über diese Theilchen weggehoben wird, hierdurch Arbeit

verzehrt und dieselbe beim Niederfallen wieder als lebendige Kraft abgibt; werden endlich diese Theilchen abgebrochen und zerrieben, so wird auch ein Theil der Arbeit in Spannkraft verwandelt. Man unterscheidet: a. Die gleitende Reibung d. i. den Widerstand beim Schleifen eines Körpers über einen anderen; eine besondere Art derselben ist die Zapfenreibung, welche bei der Drehung eines Cylindermantels auf der Innenfläche eines Hohlcylinders (liegende Zapfen) oder bei der Drehung einer Grundfläche auf einer anderen (stehende Zapfen) eintritt. b. Die rollende Reibung d. i. den Widerstand beim Rollen eines runden Körpers über eine Fläche. Die rollende Reibung ist kleiner als die gleitende, weil durch die Rollbewegung selbst die Unebenheiten der einen Fläche über die der anderen gehoben werden. Wegen des verwickelten Ursprunges der Reibung gibt es keine allgemein giltigen Gesetze über dieselbe. Innerhalb sehr enger Grenzen gelten folgende von Coulomb (1781) und von Morin (1831) gefundenen Gesetze: 1. Die Größe der Reibung, d. i. der Kraftbetrag zur Ueberwindung der Reibung, auch kurzweg die Reibung genannt, ist direct proportional dem Drucke der beiden Körper gegen einander. Man nennt den Bruchtheil des Druckes, der zur Ueberwindung der Reibung nothwendig ist, den Reibungscoëfficient, bezeichnet mit f; folglich ist die Reibung, wenn D den Druck bedeutet, = fD. — 2. Die Reibung ist unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen; denn wenn auch durch die Vergrößerung der Flächen die Zahl der zu überschreitenden Unebenheiten zunimmt, so nimmt der hierbei zu überwindende Druck auf ein Flächenelement in demselben Maße ab. 3. Der Reibungscoëfficient ist um so größer, je rauher und je weicher die Körper sind; er wird durch Poliren und Schmieren verkleinert, durch Wärme vergrößert. Er ist größer beim Uebergange aus Ruhe in Bewegung als in der Bewegung selbst, und unabhängig von der Geschwindigkeit der Bewegung. Zwischen gleichartigen Körpern ist er größer als für verschiedenartige. Er beträgt für Holz auf Holz in der Bewegung (trocken) $^1/_3$, (geschmiert) $^1/_{10}$, für Metall auf Metall (trocken) $^1/_6$, (geschmiert) $^1/_{14}$, für Holz auf Metall (trocken) $^2/_5$, (geschmiert) $^1/_{12}$. Für Zapfenreibung ist f durchschnittlich $^1/_{12}$, für rollende Reibung $^1/_{50}$. Diese Gesetze gelten nach Untersuchungen von Rennie, Hirn, Sella nicht mehr für die Flächendrucke und die Geschwindigkeiten, die in der Maschinenpraxis vorkommen; doch können wir hier auf die Aenderungen nicht eingehen. Sie gelten auch nicht mehr, wo der Druck allzu klein ist, z. B. in Uhrwerken, und wo die sich berührenden Stoffe weich, stark faserig, haarig sind, sich stark abreiben oder in einander einschneiden. Die Zapfenreibung ist kleiner bei alten als bei neuen Zapfen; ihr Coëfficient ist so klein, weil sich die Unebenheiten allmälig Bahnen schleifen. Da die rollende Reibung so viel kleiner ist als die gleitende, so ist es eine große Ersparniß an Kraft, die gleitende Reibung mittels sogenannter Frictionsrollen, wie z. B. an Klavier- und Möbelfüßen in rollende zu verwandeln. Umgekehrt verwandelt man die rollende Reibung der Wagenräder durch Hemmschuhe in gleitende, um an Abhängen die Widerstände zu vergrößern. In ähnlicher Weise macht man mittels der Bandbremsen und der Tauwindungen häufig Anwendung von der Reibung, um Bewegungen von Maschinen und Lasten zu hemmen oder zu verzögern. Ueberhaupt hat die Reibung noch mancherlei Nutzen. Ohne Reibung der Stützflächen am Boden würden weder Menschen, noch Thiere, weder gewöhnliche, noch Eisenbahnwagen sich fortbewegen können, und nur durch sehr verstärkte Reibung mittels sehr schwerer Locomotiven sind Bergeisenbahnen möglich; alles Stehende, Liegende, Angehängte würde ohne Reibung bei dem geringsten Anstoße sich fortbewegen und fallen, alles Zusammengeheftete würde aus einander fallen, alle einander nahen Körper würden zusammenlaufen, wenn die Reibung nicht wäre. Das ganze Maschinenwesen wäre ohne die Reibung unmöglich; denn durch die Reibung übertragen Räder, Rollen, Riemenscheiben die Bewegungen. Pronys Bremse beruht auf der Reibung.

2. Der Widerstand des Mediums besteht darin, daß der sich bewegende Körper wegen der Undurchdringlichkeit die vor ihm liegende Luft oder das Wasser zur Seite drängen muß, um deren Stelle einnehmen zu können, und daß für diese Arbeit ein Theil seiner lebendigen Kraft aufgezehrt wird. Schon Newton (1860) fand, daß dieser Widerstand dem Quadrat der Geschwindigkeit des Körpers proportional ist; genauere Forschungen ergaben, daß für langsame Bewegungen die erste Potenz ausreicht, und daß für sehr rasche Bewegungen auch noch die dritte Potenz hinzugenommen werden muß, woraus sich der paradoxe Schluß ziehen läßt, daß durch allzu große Geschwindigkeit ein im Wasser fallender Stein von selbst zur Ruhe kommen müßte. Auch ist dieser Widerstand der Dichte des Mediums und der Größe des zur Bewegung senkrechten Querschnittes proportional. Die Wirkung des Widerstandes hängt endlich von der Masse des Körpers ab; die kleine lebendige Kraft eines leichten Körpers ist von dem Widerstande der Luft bald aufgezehrt, besonders wenn derselbe einige Größe im Verhältnisse zu seinem Gewichte besitzt; daher sinken Federn in der Luft langsam zu Boden, und die Dunstbläschen scheinen ruhig zu schweben, während die kleine, schwere Bleikugel in der Luft fast so wie im leeren Raume fällt. So

kraftverzehrend der Widerstand des Mediums auch ist (die Kraft der Dampfschiffe wird hierdurch allein fast aufgezehrt), so hat er doch auch nützliche Anwendungen, wie zu Fallschirmen, zur Regulirung des Ganges von Maschinen z. B. von Uhrschlagwerken durch Windfänge, sodann zum Schlämmen, zum Absondern der Spreu; endlich zum künstlichen Schwimmen, zum Rudern und Fliegen. Auch mildert er die Stärke des Falles; z. B. ein 10 Sec. lang fallendes Hagelkorn von 1g würde ohne den Luftwiderstand eine lebendige Kraft von $^1/_2$mk haben, also zerstörend wie eine abgeschossene Pistolenkugel wirken.

3. **Die Steifigkeit der Seile** verursacht einen Widerstand, weil sowohl zum Krümmen als zum Gerabstrecken eine Kraft erforderlich ist. Diese Kraft wächst (nach Eytelwein 1808) mit der Spannung des Seiles, welche nach Axiom 5. der Zugkraft gleich ist, und mit dem Querschnitte des Seiles, ist aber dem Halbmesser der Rollen und Walzen umgekehrt proportional. Nach Weißbach (1848) sind neue Seile steifer als gebrauchte, getheerte um $^1/_6$ steifer als ungetheerte.

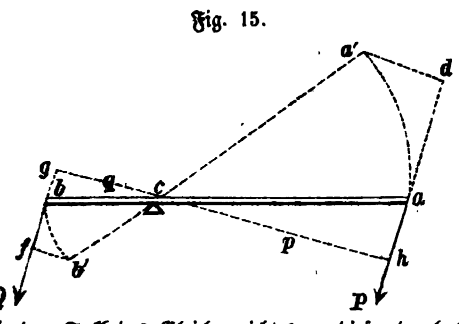
Einfache Maschinen oder mechanische Potenzen.

Bei der Betrachtung der Gesetze des Gleichgewichtes an Maschinen sehen wir zunächst von den drei zuletzt betrachteten Widerständen ab und denken uns nur eine Last an denselben, welche durch die Kraft im Gleichgewichte gehalten werden soll. — Alle Maschinen, so verwickelt ihre Construction auch sei, bestehen aus verhältnißmäßig nur wenigen, eigentlich wirksamen Elementen, die man einfache Maschinen nennt; diese sind: der Hebel, die Rolle, das Rad an der Welle, die schiefe Ebene und die Schraube, der Keil.

96

1. **Der Hebel** (Archimedes 220 v. Chr.). Der Hebel ist eine an einem Punkte unterstützte unbiegsame Stange, auf welche an verschiedenen Punkten Kräfte wirken. Denken wir uns den Hebel als eine gewichtlose Linie, so haben wir den mathematischen Hebel; jeder wirkliche Hebel ist ein physischer Hebel, bei dessen Betrachtung auch sein eigenes Gewicht in Rechnung gezogen werden muß. Der einfachste Fall ist, daß an einem mathematischen Hebel ein Gewicht (die Last) durch eine Kraft gehoben oder in Ruhe gehalten wird. Liegt der Stützpunkt (Hypomochlion) zwischen den Angriffspunkten von Kraft und Last, so nennt man den Hebel **zweiarmig**; der zweiarmige Hebel kann gleicharmig oder ungleicharmig sein. Liegen die Angriffspunkte auf einer Seite des Stützpunktes, so heißt der Hebel **einarmig**. Ursprünglich nannte man die zwei Stücke des Hebels vom Stützpunkte bis zu den Angriffspunkten die beiden Hebelarme; man ist indeß übereingekommen, unter **Hebelarm** allgemeiner die Entfernung des Stützpunktes von der Kraftrichtung zu verstehen, welche Entfernung nur bei senkrechter Kraftrichtung mit der Länge der wirklichen Arme des Hebels zusammenfällt. Unter dieser Voraussetzung gilt für alle Hebelarten und für jede beliebige Richtung der Kräfte das Gesetz: **Am Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn Kraft und Last sich umgekehrt verhalten wie die beiden Hebelarme.**

Fig. 15.



Beweis für parallele Kräfte. Um das Princip der virt. Geschwindigkeiten auf den Hebel a b (Fig. 15) anwenden zu können, denken wir uns den Hebel in Bewegung; dann darf für den Fall des Gleichgewichtes an dieser durch Kraft und Last nichts verändert werden, d. h. es muß die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein: die Projection des Kraftweges ist ad, die des Lastweges bf; folglich besteht die Gleichung $P . ad = Q . bf$ oder $P : Q = bf : ad$. Da nun Viereck ada'c $\sim$ bfb'c, so ist $bf : ad = cb : ca$; weiter

folgt aus der Aehnlichkeit der Dreiecke bcg und ach die Proportion cb : ca = cg : ch = q : p. Durch Substitution des letzten Verhältnisses für das erstere in unserer Proportion entsteht P : Q = q : p, womit der Satz für parallel wirkende Kräfte bewiesen ist. Die Richtigkeit für nicht parallele Kräfte zu beweisen, soll später eine Aufgabe für den Schüler sein. Den experimentellen Nachweis führt man am einfachsten mit einem in gleiche Theile eingetheilten und an allen Theilpunkten mit Hängringen versehenen zweiarmigen Hebel, so daß man an jeder beliebigen Stelle Lastgewichte aufhängen und diese durch die nach dem Gesetze berechneten und auf der anderen Seite angehängten Kraftgewichte an jeder Stelle balanciren kann.

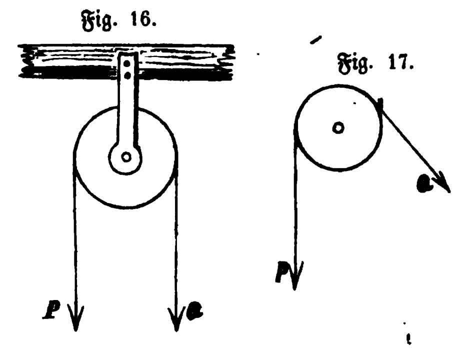
Aus der Hebelproportion ergibt sich die Productengleichung Pp = Qq; das Product einer Kraft mit ihrem Hebelarme nennt man das statische Moment der Kraft; folglich kann man das Hebelgesetz auch so aussprechen: Am Hebel ist Gleichgewicht vorhanden, wenn das statische Moment der Kraft gleich ist dem statischen Moment der Last. Wenn auf einen Hebel viele Kräfte wirken, so erhält man durch ähnliche Betrachtungen das allgemeine Gesetz: **Am Hebel ist Gleichgewicht, wenn die Summe der statischen Momente aller Kräfte, die den Hebel nach der einen Seite zu drehen streben, gleich ist der Summe der statischen Momente aller Kräfte, welche den Hebel nach der anderen Seite zu drehen streben.**

Der Hebel hat die zahlreichsten Anwendungen. Jede Hebe- und Brechstange, die vor der Last unterstützt ist, ist ein zweiarmiger Hebel; wird sie unter die Last geschoben und hinter derselben aufgesetzt, so ist sie ein einarmiger Hebel, wie alle Messer, alle Schreib- und Zeichenwerkzeuge. Zangen und Scheeren bestehen aus 2 zweiarmigen Hebeln, von denen der eine den Stützpunkt für den anderen liefert. Schlüssel und Bohrer haben ihren Stützpunkt in der Achse, der Bart oder die Schneide bilden den Hebelarm der Last, der Griff den der Kraft. Zucker- und Brodscheeren sind einarmige Hebel, ebenso der Arm und andere Glieder des Menschen, bei denen indeß die Kraft mittels eines Muskels ganz nahe am Stützpunkte wirkt und daher dem weiter entfernten Ende des Gliedes eine große Bewegung ertheilt (Geschwindigkeits-Hebel). Thürklinken und Klingelhaken sind Winkelhebel. Alle Arten von Hebeln finden sich an Maschinen; besonders wichtig sind die Leithebel an Locomotiven, die Bremshebel an Hebemaschinen, die Bewegungshebel an Geleisekreuzungen, der Balancier an Dampfmaschinen, der ein gleicharmiger Hebel ist, und die Wagebalken, die bald gleicharmig, bald ungleicharmig sind.

97 **Aufg. 101.** Die Last Q sei = 1000kg; die Kraft P = 50kg; q = 0,2m; wie groß muß der Hebelarm p der Kraft sein? Aufl.: 50 p = 1000 . 0,2, woraus p = 4m. Man kann also mittels des Hebels durch eine geringe Kraft eine große Last heben, wenn nur der Hebelarm der Kraft recht groß ist im Verhältnisse zu demjenigen der Last. — A. 102. Ein Mann schiebt eine Stange von 2m Länge unter einen Stein und stützt sie in einem Abstande von 20cm von der Steinmitte: welche Last kann er heben, wenn er einen Druck von 60kg ausüben kann? Aufl.: Q = 540kg. — A. 103. Q = 667kg; p = 2,3m q = 0,3m; wie groß ist P? Aufl.: P = 87kg. — A. 104. Q = 800kg; P = 32kg; p = 96cm, wie groß ist q? Aufl.: q = 3,84cm. — A. 105. Eine Last von 60 Ctr. soll durch eine Kraft von 60kg mittels eines Hebels von 4m Länge gehoben werden; wo muß der Stützpunkt sein? Aufl.: Die Kraft ist 5mal so klein als die Last, folglich muß ihr Hebelarm 5mal so groß sein; daher p = 3⅓m und q = ⅔m. — A. 106. Q = 244kg, P = 46kg; Hebellänge = 580cm, wo ist der Stützpunkt? Aufl.: 244 q = 46 (580 — q); daraus q = 92cm; p = 488cm. — A. 107. Q = 738,3kg, P = 58,7kg; Hebellänge = 383cm; wo liegt der Stützpunkt? Aufl.: q = 82,2cm, p = 354,8cm. — A. 108. Die Erde wiegt 14 Quadrillionen Pfunde; wenn Archimedes seinen festen Punkt auf dem Monde (50 000 M.) hätte und von der Sonne (20 Mill. M.) aus die Erde mit einem Hebel aus ihren Angeln zu heben versuchen wollte, welche Kraft müßte er aufwenden? Aufl.: 35 000 Trillionen Pfund. — A. 109. Welche Stellung müßte Archimedes haben, wenn er nur eine Kraft von 70kg hätte und den Mond als Stützpunkt benutzen würde? Aufl.: 5000 Quadrillionen Meilen von dem Monde entfernt. — A. 110. An einem Hebel wirken 6 Lasten: 180, 200, 240kg in 40, 60, 70cm Entf. nach oben und 300, 320, 360kg in 50, 80, 90cm Entf. nach unten; wo muß die Kraft von 74kg angebracht werden, um Gleichgewicht zu erzeugen? Aufl.: 74 p + 180 . 40 + 200 . 60 + 240 . 70 = 300 . 50 + 320 . 80 + 360 . 90; hieraus p = 500cm.

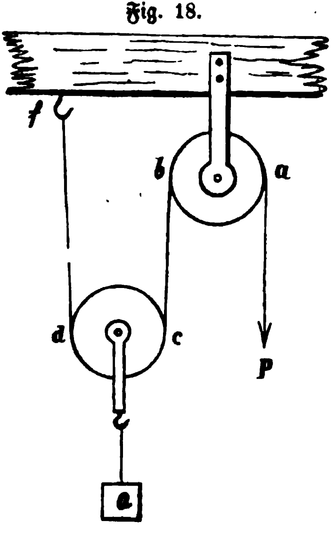
98 **2. Die Rolle.** Eine Rolle ist eine kreisförmige, dicke Scheibe, die um ihre Mittelpunktachse drehbar ist und an ihrem Umfange Schnüre, Riemen oder Ketten

aufnehmen kann. Die Achse liegt beiderseits in Lagern; kann sich die Rolle nur um ihre Achse drehen, so nennt man sie feste Rolle (Fig. 16 und 17); kann sie sich aber außerdem mit der Achse fortbewegen, so ist sie eine bewegliche Rolle.



a. **Die feste Rolle. An der festen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft gleich der Last ist.**

Beweis. Ziehen wir an dem Kraftseile um x, so ist der Weg der Kraft = x, also die Arbeit der Kraft = Px. Wenn so das Kraftseil um x verlängert wird, so wird das Lastseil um x verkürzt, die Last Q um x gehoben; folglich ist die Arbeit der Last = Qx. Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist Px = Qx, woraus P = Q. Mittels der festen Rolle wird nicht an Kraft gewonnen; sie dient daher zum Heben von nur kleinen Lasten. Eine bedeutendere Verwendung hat sie zur Aenderung der Kraftrichtung (Fig. 17).



b. **Die bewegliche Rolle. An der beweglichen Rolle ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie 1 zu 2.**

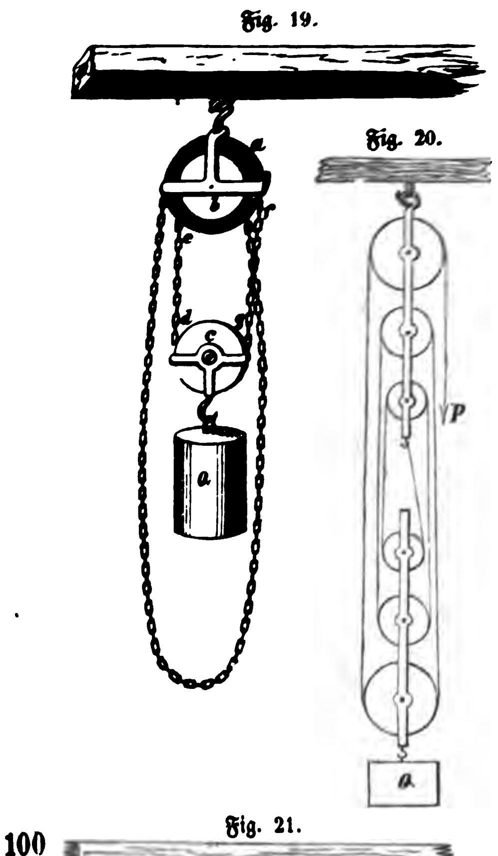
Beweis. Ziehen wir am Kraftseile um x, so ist der Weg der Kraft = x, also die Arbeit der Kraft = Px. Wenn aber das Kraftseil aP um x verlängert wird, so müssen sich die 2 Lastseile cb und df um x, also jedes um x/2 verkürzen; die Last wird also um x/2 gehoben, der Weg der Last Q ist x/2, und demnach die Arbeit der Last = Q . x/2. Da für den Fall des Gleichgewichts die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist Px = Q . x/2, woraus P = ½Q oder P : Q = 1 : 2.

3. **Die Flaschenzüge.** a. **Der Differentialflaschenzug**, eine Anwendung der beweglichen Rolle (Fig. 19), besteht aus 2 zu einem Stück gegossenen Rollen a und b von verschiedenem Radius R und r; die Kette geht über die große feste Rolle zu der beweglichen, dann aber nicht an einen festen Punkt, sondern über die kleine feste Rolle und verbindet sich dann mit dem Anfang der Kette zu einer Kette ohne Ende. **Beim Heben von Lasten ist am Differentialflaschenzuge Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie die Differenz der Radien der beiden festen Rollen zum doppelten Radius der großen festen Rolle.**

99

Beweis. Ziehen wir links soviel an der Kraftkette, daß sich die feste Rolle halb umdreht, so ist der Kraftweg 2R, also die Arbeit der Kraft 2RP. Ginge nun die Lastkette de nach einem festen Punkte, so würde sich die Lastrolle um R heben. Weil jene Kette aber an die kleine Rolle b geht, die sich dann auch halb umdreht, so senkt sich der linke Berührungspunkt dieser Kette um 2r, also verlängert sich jeder der beiden Kettentheile de und gf um r, und die Lastrolle senkt sich um r. Folglich beträgt die Resthebung der Last R—r und ihre Arbeit Q (R—r). Da für den Fall des Gleichgewichtes die Arbeit der Kraft gleich der Arbeit der Last sein muß, so ist 2PR = Q (R—r), woraus P : Q = R—r : 2R.

b. **Der gewöhnliche Flaschenzug** (Fig. 20) besteht aus einem festen Gehäuse oder Flasche und einer beweglichen Flasche, welche gleich viele, je 2 gleiche Rollen enthalten, die durch ein einziges, von einer festen immer zu der gleichen beweglichen Rolle gehendes Seil verbunden sind. **An dem Flaschenzuge findet Gleichgewicht statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie 1 zur Anzahl der Lastseile.**



Beweis. Ziehen wir wieder an dem Kraftseile um x, so ist die Arbeit der Kraft = Px. Wenn sich nun das Kraftseil um x verlängert, so müssen sich alle n Lastseile zusammen um x verkürzen; daher wird jedes Lastseil, da sie gespannt bleiben und sich sonach um gleichviel verkürzen müssen, um $^1/_n . x$ verkürzt; der Weg der Last ist $^1/_n . x$ und die Arbeit der Last $^1/_n . xQ$. Durch die allgemeine Gleichgewichtsbedingung entsteht daher die Gleichung $Px = ^1/_n . Qx$, woraus $P : Q = 1 : n$.

c. **Der Potenzenflaschenzug oder Rollenzug** (Fig. 21) besteht aus einer festen und n beweglichen Rollen, von denen die unterste die Last trägt. **Am Potenzenflaschenzuge ist Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie 1 zur sovielten Potenz von 2, als bewegliche Rollen vorhanden sind.**

Der Beweis ist durch wiederholte Anwendung des bei der beweglichen Rolle eingeschlagenen Verfahrens zu führen; die Arbeit der Kraft ist Px, die Arbeit der Last $Q (x : 2. 2. 2. 2 \ldots .) = Q (x : 2^n)$, woraus $P : Q = 1 : 2^n$.

100

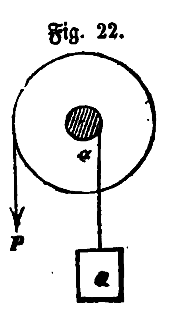
Aufg. 111. Die Gesetze für die feste und bewegliche Rolle sind mit Benutzung des Hebelgesetzes nachzuweisen. Andeutung: Die feste Rolle ist ein Hebel, dessen Stützpunkt in der Achse liegt; bei der beweglichen Rolle ist der Stützpunkt in dem Berührungspunkte d der Rolle mit dem Aufhängseil df (Fig. 18). — **A. 112.** Das Gesetz des Differentialflaschenzugs für das Herablassen der Last, wobei am rechten losen Kettentheil (Fig. 19) gezogen wird, zu finden? Aufl.: $P : Q = r - R : 2r$. — **A. 113.** Die Kraft zum Heben und Herablassen der Last Q zu finden für den Fall, daß der Durchmesser der kleineren Rolle $^3/_4$ von dem der größeren sei? Aufl.: $P = ^1/_8 Q$ und $P = ^1/_8 Q$. — **A. 114.** Aus dem Hebelgesetze zu schließen, daß an dem Differentialflaschenzuge (Fig. 19) beim Senken mehr Kraft zum Gleichgewichthalten nöthig ist als beim Heben. Andeutung: der Unterschied der beiden festen Rollen a und b. — **A. 115.** Welcher Theil der Last ist an dem in Fig. 21 abgebildeten Rollenzuge zum Gleichgewichte nöthig? Aufl.: Der 16te Theil. — **A. 116.** Warum wird trotz dieser großen Kraftersparniß derselbe nur selten angewendet? **A. 117.** Bei genauer Berechnung muß für den Rollenzug auch das Gewicht der Rollen berücksichtigt werden. Der Rollenzug enthalte 3 bewegliche Rollen von 10^{kg}, 8^{kg} und 6^{kg} Gewicht. Die Last sei $= 300^{kg}$. Wie groß muß die Kraft sein? Aufl.:

$P = ([(300 + 10)\ ^1/_2 + 8]\ .\ ^1/_2 + 6)\ .\ ^1/_2 = 43^3/_4$kg. — A. 118. Wie groß müßte die Zahl der beweglichen Rollen (ohne Rücksicht auf das Gewicht) sein, um mit einer Kraft von 20kg eine Last von 640kg zu heben? Aufl.: $20 : 640 = 1 : 2^n$; hieraus $n = \log 32 : \log 2 = 5$. — A. 119. Wie groß ist die Kraft P, welche einen Rollenzug von n gleichen beweglichen Rollen mit dem Gewichte G und die Last Q im Gleichgewichte hält. Aufl.: $P = \frac{1}{2^n}(Q+G) + \frac{1}{2^{n-1}} G + \frac{1}{2^{n-2}} G + \ldots \frac{1}{2} G = \frac{Q}{2^n} + \frac{2^n-1}{2^n} \cdot G = \frac{Q}{2^n} + \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) G = \frac{Q-G}{2^n} + G$. Bei Ableitung dieser Formel muß man die Summenformel für eine geometrische Reihe anwenden. — A. 120. Ein Rollenzug enthält 10 bewegliche Rollen vom Gewichte von 1kg, welche Kraft ist nöthig, um 1000kg zu tragen? Aufl.: $P = 1^{999}/_{1024}$kg.

101

Das Rad an der Welle. Die Last wirkt an dem Umfange einer cylindrischen Walze, während die Kraft an dem Umfange eines mit der Walze unauflöslich verbundenen Kreises wirkt. Dieser Kreis kann ein Rad sein, dessen Arme oder Zähne von der Kraft gezogen oder gedrückt werden, wie beim Spillenrade oder dem Räderwerke; er kann auch der Weg einer Stange sein, welche durch die Welle gesteckt ist, wie bei Erdwinden und Haspel, oder welche an das eine Ende der Welle befestigt ist und dann Kurbel genannt wird. Es kann auch ein hohles Rad sein, in welchem auf dem Umfange Menschen oder Thiere gehen. Die Welle kann auch aufrecht stehen und mit einem langen Arme versehen sein, an dessen Ende ein Mensch drückt oder ein Pferd angeschirrt ist, wie in den alten Oelmühlen u. dergl. — Beim Rad an der Welle ist Gleichgewicht, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Radius der Welle zum Radius des Rades.

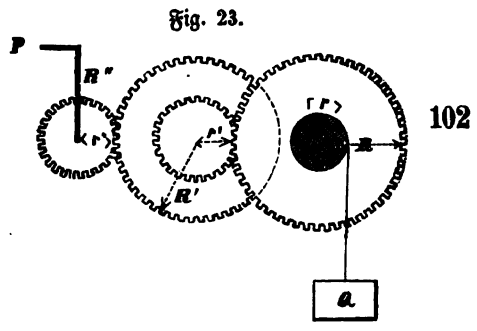
Fig. 22.



Beweis. Wird durch den Zug der Kraft das Rad halb umgedreht, so ist der Weg der Kraft in ihrer eigenen Richtung gleich dem Durchmesser 2R des Rades, also die Arbeit der Kraft = 2RP; in diesem Falle hat sich auch die Welle halb umgedreht und die Last um den Durchmesser 2r der Welle gehoben, so daß die Arbeit der Last = 2rQ. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist 2RP = 2rQ, woraus P : Q = r : R.

Das Rad an der Welle hat die zahlreichsten Verwendungen; die Kurbel ist eines der häufigsten Maschinenelemente. — Die Kraft eines Wasserrades ist um so größer, je mehr das Rad die Welle an Größe übertrifft. — Alle Arten von Winden, Erdwinden, Wagenwinden, Aufzugwinden, alle Göpel, Tummelbäume und Krahne sind Anwendungen des Wellrades; besonders häufig tritt es in Form des Räderwerkes auf und wird dabei ebenso häufig zur Vergrößerung von Geschwindigkeit mit Verlust von Kraft, als zur Vergrößerung von Kraft mit Verlust von Geschwindigkeit gebraucht; im ersten Falle greifen große auf der Kraftwelle sitzende gezahnte Räder in kleine ein, im letzten kleine auf der Kraftwelle sitzende Räder in große; beides kann auch durch Rollen mit Treibriemen geschehen. Nicht blos Geschwindigkeits- und Kraftänderungen, sondern auch Aenderungen in der Richtung der Bewegung werden durch Räderwerke erzielt.

Fig. 23.



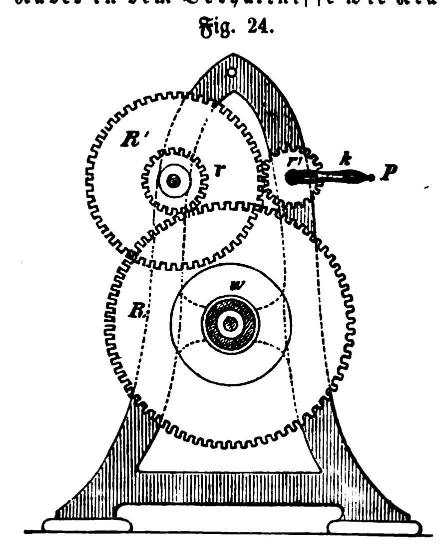
102

Aufg. 121. Auf einer Lastwelle (Fig. 23) sitzt ein Zahnrad fest, das in ein anderes kleines Zahnrädchen, Getriebe genannt, eingreift; auf der Achse desselben sitzt ein zweites Zahnrad, das abermals in ein Getriebe greift, auf welchem eine Kurbel sitzt. Wie groß muß die Kraft P sein, welche an dieser Kurbel wirkt, um die Last Q an der Welle zu überwinden?

Nennen wir die am Umfange des ersten Rades (R) nöthige Kraft p, so ist p : Q = r : R. Diese Kraft drückt auf das erste Getriebe (r'), wirkt also an dem Umfange desselben als Last. Ist die an dem Umfange des zweiten Rades zur Ueberwindung dieses Druckes

p nöthige Kraft = p', so ergibt sich $p' : p = r' : R'$. Diese Kraft wirkt als Last an dem zweiten Getriebe, muß also durch die Kraft P balancirt werden; daher entsteht die Proportion $P : p' = r'' : R''$. Multipliciren wir die drei Gleichungen, so entsteht $P : Q = rr'r'' : RR'R''$. Bei dem Räderwerke ist folglich Gleichgewicht, wenn das Product der Radien aller Getriebe zu dem Producte der Radien aller Räder in dem Verhältnisse wie Kraft zur Last steht. Sind z. B. die großen R immer 10 mal so groß wie die kleinen r, so ist $P : Q = 1 : 1000$. Es wird also die Kraft durch das Räderwerk 1000mal so groß; doch geht durch die Reibung viel von diesem Gewinne verloren, und die Geschwindigkeit wird dabei ebenso viel mal kleiner. Würde dagegen an dem Umfange des Rades R die Kraft wirken und durch das Getriebe r' auf R', von da durch das Getriebe r'' auf ein Rad R'' und von diesem auf eine vierte Welle r''' übertragen, so würde deren Geschwindigkeit in dem Verhältnisse $R R' R'' : r' r'' r'''$ größer, die Kraft aber in demselben Verhältnisse kleiner geworden sein. — A. 122. Wie groß ist die an der Kurbel k nöthige Kraft P, um mittels der Aufzugswinde (Fig. 24) die Last Q zu heben, wenn zweifache Räderübersetzung stattfindet, und die Buchstaben an den Rädern zugleich die Radien derselben bezeichnen. Die Last Q hängt an der Welle w.

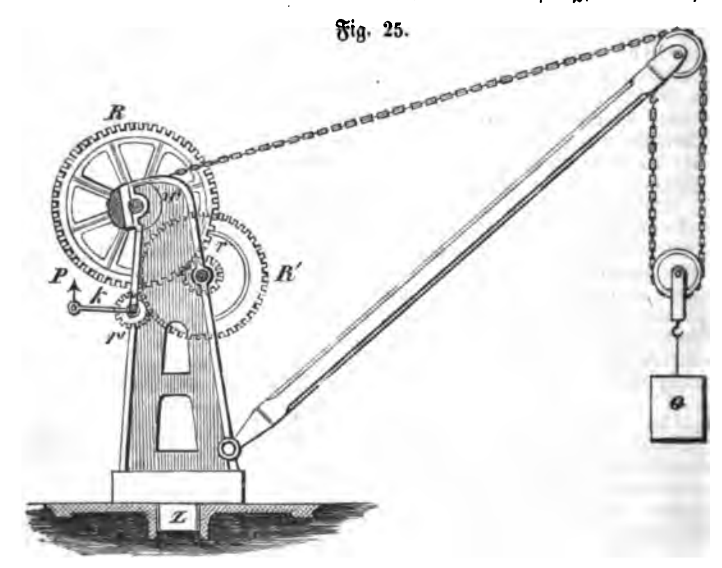
Fig. 24.



Aufl.: $P = Q \cdot \frac{r'}{k} \cdot \frac{r}{R'} \cdot \frac{w}{R} = Q \cdot \frac{w}{k} \cdot \frac{r'}{R'} \cdot \frac{r}{R}$.

Wenn umgekehrt z. B. $w = 15^{cm}$, $k = 45^{cm}$ und die Uebersetzungszahlen $R : r = 7$ und $R' : r' = 5$ sind, so kann durch eine Kraft

Fig. 25.

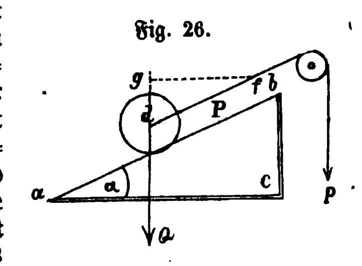


von 20^{kg}, die ein Mann leicht aufwenden kann, eine Last gehoben werden von 1000^{kg}. — A. 123. An dem Krahn (Fig. 25) wirkt die Kraft eines Mannes drehend an der Kurbel k mittels des Getriebes r' auf das Rad R', auf dessen Achse das Getriebe r sitzt und das große Rad R bewegt, welches mit der Welle w einerlei Achse hat. Eine an der Welle befestigte Kette geht über eine feste Rolle um eine bewegliche Rolle, an welcher die

Last Q hängt. Wie groß muß die Kraft P, abgesehen von den Hindernissen, sein, um Q zu heben, wenn die Buchstaben zugleich immer die Radien bezeichnen. Aufl.: $P = \frac{1}{2} \cdot \frac{w}{R} \cdot \frac{r}{R'} \cdot \frac{r'}{k}$. Der ganze Krahn läßt sich um den Zapfen z drehen; daher wird der Krahn zum Auf- und Abladen großer Lasten an Flüssen, Eisenbahnen, Bestättereien gebraucht. — A. 124. Wie groß ist die zur Ueberwindung der Zapfenreibung der festen Rolle nöthige Kraft, wenn die Radien des Zapfens und der Rolle r und R sind? Aufl.: Die Reibung ist $= 2 \cdot {}^1/_{12}\,(2P + G)$, wenn G das Gewicht der Rolle. Am Umfange der Rolle muß die Kraft sein, $= {}^1/_6\,(2P + G) \cdot r : R$. — A. 125. Wie groß ist die am Umfange des Rades nöthige Kraft zur Ueberwindung der Zapfenreibung des Rades an der Welle? Aufl.: Die Reibung selbst ist $= 2 \cdot {}^1/_{12}\,(P + Q + G)$; die Kraft am Umfange des Rades $= {}^1/_6\,(P + Q + G) \cdot r : R$. — A. 126. Nach Redtenbacher ist die Reibung der Zahnräder $= Df\pi\,({}^1/N + {}^1/n)$, worin N und n die Zahl der Zähne der beiden Räder bedeuten; wenn nun in dem Räderwerke (Fig. 23) das Rad R die Zahnzahl n hat, welches ist dann der an der Kurbel nöthige Kraftbetrag zur Ueberwindung der Reibung an diesem Räderwerke, wobei wir indeß von dem durch diese Kraft erzeugten Drucke absehen wollen? Aufl.: Der Druck zwischen den Zähnen von R und r' ist $= Qr : R$ und zwischen den Zähnen von R' und r'' ist dieser Druck $= Qrr' : RR'$; daher ist der auf die Kurbel reducirte Betrag der Reibung $= \frac{Qr}{R} \cdot f\pi \left(\frac{1}{n} + \frac{r'}{R} \cdot \frac{1}{n}\right) \cdot \frac{r'r''}{R'R''} + \frac{Qrr'}{RR'} \cdot f\pi \left(\frac{1}{n} \cdot \frac{r'}{R} \cdot \frac{R'}{r'} + \frac{1}{n} \cdot \frac{R'}{R} \cdot \frac{r''}{R'}\right) \frac{r''}{R''} = \frac{Qrr'r''}{RR'R''} \cdot \frac{f\pi}{nR}\,(R + r' + R' + r'')$.

4. Die schiefe Ebene. Unter einer schiefen Ebene verstehen wir eine gegen den Horizont geneigte Ebene, auf welcher eine Last liegt. Es soll die Größe der Kraft gefunden werden, welche das Herabrollen der Last verhindert, und welche zum Heben der Last in jedem Augenblicke der Bewegung verwendet werden muß, wobei wir von den Hindernissen der Bewegung, wie Reibung und Widerstand der Luft absehen. Die Richtung der Kraft ist eine beliebige; wir fassen nur die zwei Fälle ins Auge, wo die Kraft parallel zur schiefen Ebene, und wo sie wagrecht wirkt. Die Linie ab (Fig. 26) nennt man die Länge, bc die Höhe und ac die Basis der schiefen Ebene. 103

Fig. 26.



a. Für den Fall der parallelen Wirkung ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Länge derselben.

Beweis. Ziehen wir die Last Q mittels der parallelen Kraft P von dem Fuße a der schiefen Ebene bis zum Gipfel b derselben, so hat die Kraft in ihrer eigenen Richtung den Weg $ab = l$ zurückgelegt, wodurch ihre Arbeit $= Pl$ wird; die Last Q hat sich dann in ihrer eigenen lothrechten Richtung um die Höhe $bc = h$ gehoben, also die Arbeit Qh verzehrt. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist demnach $Pl = Qh$, woraus $P : Q = h : l$. Hieraus folgt auch, daß $P = Q \cdot h : l = Q \sin \alpha$.

b. Für den Fall der wagrechten Wirkung ist Gleichgewicht, wenn die Kraft sich zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis derselben.

Beweis. Ziehen wir die Last Q mittels der wagrechten Kraft P von dem Fuße der schiefen Ebene bis zum Gipfel derselben, so hat die Kraft in ihrer eigenen Richtung den Weg $ac = b$ zurückgelegt und so die Arbeit Pb vollbracht, während die von der Last Q consumirte Arbeit $= Qh$ ist; hieraus ergibt sich nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung, daß $Pb = Qh$ ist, woraus $P : Q = h : b$. Hieraus folgt auch, daß $P = Qh : b = Q \tang \alpha$.

Die beiden Sätze über die schiefe Ebene kann man experimentell nachweisen mittels eines Apparates mit einer drehbaren schiefen Ebene, welche man in die verschiedensten Stellungen bringen und in denselben durch eine Schraube befestigen kann; auf die schiefe 104

Ebene wird ein Messingcylinder gelegt, von dessen Rähmchen eine Schnur über eine Rolle zu einer Wagschale geht. Die Gewichte, welche den Messingcylinder balanciren sollen, werden nach den beiden Sätzen im voraus berechnet und müssen dann das Gleichgewicht herstellen. — Im Leben wird eine directe Anwendung der schiefen Ebene meist nach der ersten Wirkungsart gemacht; man befördert auf ansteigenden Straßen und Eisenbahnen Lasten in die Höhe mit verhältnißmäßig kleinen Kräften; denn, abgesehen von der Reibung, braucht die Kraft nur einen durch den Sinus des Neigungswinkels bestimmten Bruchtheil der Last zu betragen; macht man daher den Neigungswinkel oder die Steigung sehr klein, indem man die Straßen in Windungen an Bergen hinaufführt, so kann man große Lasten auf denselben befördern. Für den Winkel Null ergibt sich P auch gleich Null; dies ist auch richtig, weil eine einmal in wagrechte Bewegung gesetzte Masse, abgesehen von den Hindernissen, nach dem Gesetze der Trägheit ins Unendliche in derselben Richtung fortgehen würde. Die Hindernisse betragen aber auf gewöhnlichen Straßen $^1/_{15}$—$^1/_{30}$, auf Eisenbahnen $^1/_{180}$—$^1/_{240}$ der Last, und dieser Betrag muß demnach auf einer wagrechten Straße von der Kraft fortwährend überwunden werden, wenn die Masse einmal in Bewegung ist. Dieser Betrag ist zwar bei der schiefen Ebene etwas kleiner, aber vergrößert doch immer die nöthige Kraft beim Hinaufbefördern; beim Niedergleiten auf der schiefen Ebene wird die das Herabrollen hindernde Kraft durch den Betrag der Hindernisse verkleinert. Man benutzt daher die schiefe Ebene als Schleife beim Abladen, beim Herablassen von Lasten in Keller u. s. w.

105 **Aufg.** 127. Auf einer schiefen, glatten Fläche liegt eine glatte Kugel von 1000^{kg} Gewicht; welche Kraft muß an einem parallelen Seile wirken, wenn die schiefe Ebene auf einer Länge von 10^m eine Höhe von 50^{cm}, also eine Steigung von 1 auf 20 hat, um die Last vor dem Herabrollen zu schützen oder die in Bewegung gesetzte Masse weiter zu bewegen? Aufl.: $P : 1000 = {^1/_2} : 10 = 1 : 20$, woraus $P = 50^{kg}$. — Aufg. 128. Wie viel % dürfte die Steigung blos betragen, wenn ein Mann, der nur mit einer Kraft von 20^{kg} dauernd ziehen könnte, die Last fortbewegen sollte? Aufl.: $20 : 1000 = h : 100$, woraus $h = 2$ auf 100 oder 2%. — Aufg. 129. Mit welcher Kraft muß auf einer Straße, wo die Hindernisse $^1/_{30}$ betragen und die Steigung 5% oder 1 : 20 ausmacht, an einem Wagen von 10 Ctr. Gewicht gezogen werden, um ihn vor dem Hinabrollen zu schützen? Aufl.: $P = (^1/_{20} - {^1/_{30}}) . 500 = 8^1/_3{}^{kg}$. — A. 130. Welches Gewicht darf ein Wagen haben, der auf einer Straße von 1 : 20 Steigung, und wo die Hindernisse $^1/_{40}$ der Last betragen, mit einer Geschwindigkeit von $^1/_2{}^m$ durch ein Pferd gezogen werden soll? Aufl.: Sei x das gesuchte Gewicht, so ist die Kraft $= {^1/_2}x + {^1/_{40}}x$; daher der Effect des Pferdes $= {^{3x}/_{40}} . {^1/_2}{}^{mk}$. Da nun eine Pferdekraft $= 75^{mk}$ ist, so entsteht die Gleichung $^{3x}/_{80} = 75$, woraus $x = 2000^{kg}$. — A. 131. Auf der Semering-Bahn, wo die Steigung 1 : 35 ist und die Hindernisse $^1/_{200}$ der Last betragen, soll ein Zug von 91 Tonnen à 1000^{kg} mit einer Geschwindigkeit von 6^m bergan steigen; wie groß müßte der Effect der Locomotive sein? Aufl.: $= 91\,000^0 (^1/_{35} + {^1/_{200}})\, 6 = 18330^{mk} = 244^2/_5{}^e$.

106 **5. Die Schraube.** Die Schraube ist eine schiefe Ebene, welche um einen Cylinder gewunden ist. Schneidet man aus einer dicken Kautschukplatte eine schiefe Ebene, wie abcdef in Fig. 27, deren Basis ab gleich dem Umfange der Grundfläche eines Cylinders ist, und windet dann dieselbe um den Cylinder, so nimmt sie die Lage a′b′c′d′e′f′ an; das obere Ende c′d′ derselben erscheint dann senkrecht über dem Anfange a′e′, die eigentliche schiefe Ebene acde selbst bildet dann ein vollständiges Gewinde oder einen Schraubengang, die Höhe bc der schiefen Ebene bildet die Gewindhöhe oder Höhe eines Schraubenganges b′c′, und die Basis der schiefen Ebene erscheint als Umfang des Schraubenbolzens oder der Schraubenspindel, wie man den umwundenen Cylinder nennt. Bringt man nun in das Innere eines

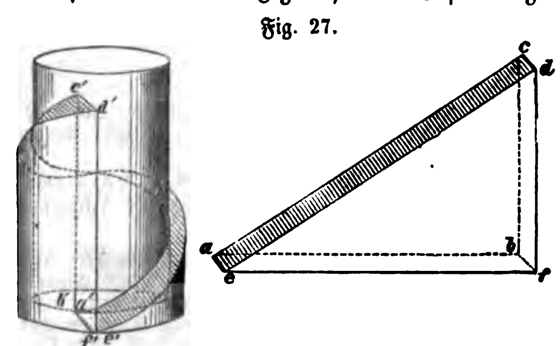
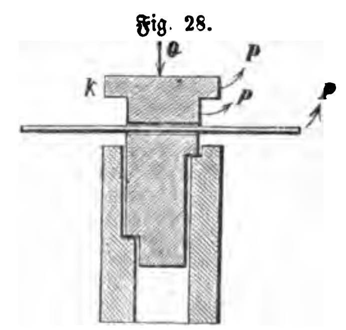


Fig. 27.

hohlen Cylinders, dessen lichte Weite gleich dem Durchmesser der Spindel ist, eine ganz gleiche gewundene schiefe Ebene, eine Einrichtung, die man Schraubenmutter nennt, und setzt dann die Spindel mit ihrer Windung auf diejenige der Mutter, wie es Fig. 28 im Durchschnitte zeigt, so wird die Spindel mit ihrem ganzen Gewichte und einer noch etwa auf derselben liegenden Last Q auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter drücken, und würde drehend hinabgleiten, wenn keine Reibung stattfände. Sehen wir von derselben ab, so können wir doch das Hinabgleiten verhüten oder auch die schon in steigende Drehung versetzte Spindel weiter drehen, wenn wir am Umfange derselben eine wagrechte Kraft P anbringen. Alsdann wirken Last und Kraft gerade so auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter wie in dem zweiten Falle der Lehre von der schiefen Ebene. Es findet daher nach dem dort gefundenen Satze Gleichgewicht bei der Schraube statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis derselben, d. h. wie die Gewindhöhe zum Umfange der Spindel. Gewöhnlich wirkt nun die Kraft P nicht am Umfange der Spindel, sondern am Umfange eines Schraubenkopfes k von größerem Durchmesser, oder am Ende einer Kurbel oder einer durch den Bolzen gesteckten Hebelstange; dadurch wird der Weg der Kraft und die zu überwindende Last um so viel größer, als der Umfang des von der Kraft beschriebenen Kreises den Umfang der Spindel übertrifft. Es hat daher das Gesetz des Gleichgewichtes für die Schraube allgemeiner folgende Fassung: **Bei der Schraube verhält sich im Falle des Gleichgewichtes die Kraft zur Last wie die Gewindhöhe zum Umfange des Kraftkreises.** Aus diesem Gesetze ergibt sich eine Folgerung, auf welcher die meisten der so zahlreichen Anwendungen der Schraube beruhen: Wenn man nämlich durch eine drehend wirkende Kraft eine Last überwinden kann, welche in der Richtung der Spindelachse wirkt, so muß nach dem fünften Axiom die Kraft in dieser Richtung einen der Last gleichen und entgegengesetzten Druck ausüben. Man kann demnach durch Umdrehen einer Schraube einen Druck in der Richtung der Spindelachse erzeugen; die Richtung dieses Druckes kann man umkehren, indem man die Spindel in entgegengesetzter Richtung dreht.

Fig. 28.



Bei den practisch verwendeten Schrauben ist es nicht eine einzige schiefe Ebene, welche an der Grundfläche der Spindel ihre Windungen beginnt, sondern mehrere in gleichen Abständen; außerdem besitzen die schiefenen Ebenen eine solche Länge, daß sich ihre Umwindungen öfter wiederholen; endlich sind eigentlich nicht schiefe Ebenen mit ihrer ganzen massiven Unterlage, sondern nur die der Länge nächsten Streifen um den Kern der Spindel gewunden.

Sind diese Streifen vierkantig rechteckig (Fig. 29 a), so entstehen Schrauben mit flachem Gewinde (Fig. 29 b); sind dieselben aber dreikantig (Fig. 30 a), so entstehen Schrauben mit scharfem Gewinde (Fig. 30 b). Die Gewinde liegen unmittelbar an einander und bedecken

Fig. 29. a. b.

Fig. 30. a. b.

Ebene wird ein Messingcylinder gelegt, von dessen Rähmchen eine Schnur über eine Rolle zu einer Wagschale geht. Die Gewichte, welche den Messingcylinder balanciren sollen, werden nach den beiden Sätzen im voraus berechnet und müssen dann das Gleichgewicht herstellen. — Im Leben wird eine directe Anwendung der schiefen Ebene meist nach der ersten Wirkungsart gemacht; man befördert auf ansteigenden Straßen und Eisenbahnen Lasten in die Höhe mit verhältnißmäßig kleinen Kräften; denn, abgesehen von der Reibung, braucht die Kraft nur einen durch den Sinus des Neigungswinkels bestimmten Bruchtheil der Last zu betragen; macht man daher den Neigungswinkel oder die Steigung sehr klein, indem man die Straßen in Windungen an Bergen hinaufführt, so kann man große Lasten auf denselben befördern. Für den Winkel Null ergibt sich P auch gleich Null; dies ist auch richtig, weil eine einmal in wagrechte Bewegung gesetzte Masse, abgesehen von den Hindernissen, nach dem Gesetze der Trägheit ins Unendliche in derselben Richtung fortgehen würde. Die Hindernisse betragen aber auf gewöhnlichen Straßen $^1/_{15}$—$^1/_{30}$, auf Eisenbahnen $^1/_{180}$—$^1/_{240}$ der Last, und dieser Betrag muß demnach auf einer wagrechten Straße von der Kraft fortwährend überwunden werden, wenn die Masse einmal in Bewegung ist. Dieser Betrag ist zwar bei der schiefen Ebene etwas kleiner, aber vergrößert doch immer die nöthige Kraft beim Hinaufbefördern; beim Niedergleiten auf der schiefen Ebene wird die das Herabrollen hindernde Kraft durch den Betrag der Hindernisse verkleinert. Man benutzt daher die schiefe Ebene als Schleife beim Abladen, beim Herablassen von Lasten in Keller u. s. w.

105 **Aufg.** 127. Auf einer schiefen, glatten Fläche liegt eine glatte Kugel von 1000^{kg} Gewicht; welche Kraft muß an einem parallelen Seile wirken, wenn die schiefe Ebene auf einer Länge von 10^m eine Höhe von 50^{cm}, also eine Steigung von 1 auf 20 hat, um die Last vor dem Herabrollen zu schützen oder die in Bewegung gesetzte Masse weiter zu bewegen? Aufl.: $P : 1000 = {}^1/_2 : 10 = 1 : 20$, woraus $P = 50^{kg}$. — Aufg. 128. Wie viel % dürfte die Steigung blos betragen, wenn ein Mann, der nur mit einer Kraft von 20^{kg} dauernd ziehen könnte, die Last fortbewegen sollte? Aufl.: $20 : 1000 = h : 100$, woraus $h = 2$ auf 100 oder 2%. — Aufg. 129. Mit welcher Kraft muß auf einer Straße, wo die Hindernisse $^1/_{30}$ betragen und die Steigung 5% oder 1 : 20 ausmacht, an einem Wagen von 10 Ctr. Gewicht gezogen werden, um ihn vor dem Hinabrollen zu schützen? Aufl.: $P = ({}^1/_{20} - {}^1/_{30}) . 500 = 8^1/_3{}^{kg}$. — A. 130. Welches Gewicht darf ein Wagen haben, der auf einer Straße von 1 : 20 Steigung, und wo die Hindernisse $^1/_{40}$ der Last betragen, mit einer Geschwindigkeit von $^1/_2{}^m$ durch ein Pferd gezogen werden soll? Aufl.: Sei x das gesuchte Gewicht, so ist die Kraft $= {}^1/_2 x + {}^1/_{40} x$; daher der Effect des Pferdes $= {}^{3x}/_{40} . {}^1/_2{}^{mk}$. Da nun eine Pferdekraft $= 75^{mk}$ ist, so entsteht die Gleichung $^{3x}/_{80} = 75$, woraus $x = 2000^{kg}$. — A. 131. Auf der Semering-Bahn, wo die Steigung 1 : 35 ist und die Hindernisse $^1/_{200}$ der Last betragen, soll ein Zug von 91 Tonnen à 1000^{kg} mit einer Geschwindigkeit von 6^m bergan steigen; wie groß müßte der Effect der Locomotive sein? Aufl.: $= 91\,000^0 ({}^1/_{35} + {}^1/_{200})\, 6 = 18330^{mk} = 244^2/_5{}^e$.

106 **5. Die Schraube.** Die Schraube ist eine schiefe Ebene, welche um einen Cylinder gewunden ist. Schneidet man aus einer dicken Kautschukplatte eine schiefe Ebene, wie abcdef in Fig. 27, deren Basis ab gleich dem Umfange der Grundfläche eines Cylinders ist, und windet dann dieselbe um den Cylinder, so nimmt sie die Lage a'b'c'd'e'f' an; das obere Ende c'd' derselben erscheint dann senkrecht über dem Anfange a'e', die eigentliche schiefe Ebene acde selbst bildet dann ein vollständiges Gewinde oder einen Schraubengang, die Höhe bc der schiefen Ebene bildet die Gewindhöhe oder Höhe eines Schraubenganges b'c', und die Basis der schiefen Ebene erscheint als Umfang des Schraubenbolzens oder der Schraubenspindel, wie man den umwundenen Cylinder nennt. Bringt man nun in das Innere eines

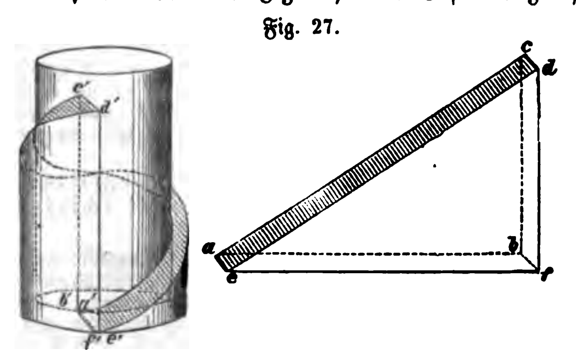
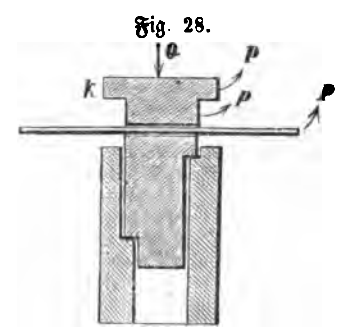


Fig. 27.

hohlen Cylinders, dessen lichte Weite gleich dem Durchmesser der Spindel ist, eine ganz gleiche gewundene schiefe Ebene, eine Einrichtung, die man Schraubenmutter nennt, und setzt dann die Spindel mit ihrer Windung auf diejenige der Mutter, wie es Fig. 28 im Durchschnitte zeigt, so wird die Spindel mit ihrem ganzen Gewichte und einer noch etwa auf derselben liegenden Last Q auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter drücken, und würde drehend hinabgleiten, wenn keine Reibung stattfände. Sehen wir von derselben ab, so können wir doch das Hinabgleiten verhüten oder auch die schon in steigende Drehung versetzte Spindel weiter drehen, wenn wir am Umfange derselben eine wagrechte Kraft P anbringen. Alsdann wirken Last und Kraft gerade so auf die schiefe Ebene der Schraubenmutter wie in dem zweiten Falle der Lehre von der schiefen Ebene. Es findet daher nach dem dort gefundenen Satze Gleichgewicht bei der Schraube statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis derselben, d. h. wie die Gewindhöhe zum Umfange der Spindel. Gewöhnlich wirkt nun die Kraft P nicht am Umfange der Spindel, sondern am Umfange eines Schraubenkopfes k von größerem Durchmesser, oder am Ende einer Kurbel oder einer durch den Bolzen gesteckten Hebelstange; dadurch wird der Weg der Kraft und die zu überwindende Last um so viel größer, als der Umfang des von der Kraft beschriebenen Kreises den Umfang der Spindel übertrifft. Es hat daher das Gesetz des Gleichgewichtes für die Schraube allgemeiner folgende Fassung: *Bei der Schraube verhält sich im Falle des Gleichgewichtes die Kraft zur Last wie die Gewindhöhe zum Umfange des Kraftkreises.* Aus diesem Gesetze ergibt sich eine Folgerung, auf welcher die meisten der so zahlreichen Anwendungen der Schraube beruhen: Wenn man nämlich durch eine drehend wirkende Kraft eine Last überwinden kann, welche in der Richtung der Spindelachse wirkt, so muß nach dem fünften Axiom die Kraft in dieser Richtung einen der Last gleichen und entgegengesetzten Druck ausüben. Man kann demnach durch Umdrehen einer Schraube einen Druck in der Richtung der Spindelachse erzeugen; die Richtung dieses Druckes kann man umkehren, indem man die Spindel in entgegengesetzter Richtung dreht.

Fig. 28.



Bei den practisch verwendeten Schrauben ist es nicht eine einzige schiefe Ebene, welche an der Grundfläche der Spindel ihre Windungen beginnt, sondern mehrere in gleichen Abständen; außerdem besitzen die schiefenen Ebenen eine solche Länge, daß sich ihre Umwindungen öfter wiederholen; endlich sind eigentlich nicht schiefe Ebenen mit ihrer ganzen massiven Unterlage, sondern nur die der Länge nächsten Streifen um den Kern der Spindel gewunden.

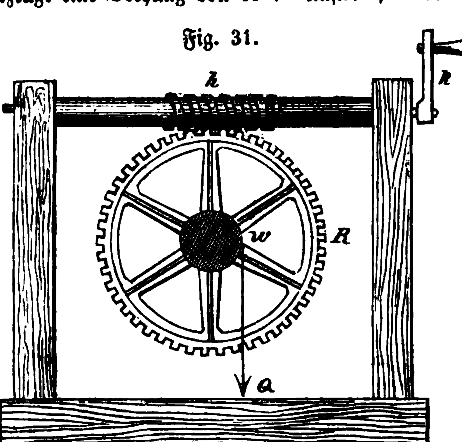
Fig. 29. Fig. 30.

Sind diese Streifen vierkantig rechteckig (Fig. 29 a), so entstehen Schrauben mit flachem Gewinde (Fig. 29 b); sind dieselben aber dreikantig (Fig. 30 a), so entstehen Schrauben mit scharfem Gewinde (Fig. 30 b). Die Gewinde liegen unmittelbar an einander und bedecken

die ganze Oberfläche des Bolzens und ebenso die ganze Innenfläche der Mutter. Dadurch wird die Wirkung der Schraube ununterbrochen, ohne daß hierdurch die Reibung vergrößert wird; denn die Reibung ist ja von der Größe der Berührungsflächen unabhängig. Indessen ist dieselbe hier doch sehr groß, weil sie eben gleitende Reibung ist. Gerade von dieser großen Reibung aber macht man die vielfältigste Anwendung; denn diese kann schon für sich allein an einer Maschine eine Last im Gleichgewichte halten; sie macht aber auch die Schrauben zur Befestigung geeignet. Wenn man z. B. eine Schraube mit scharfem Gewinde in Holz hineindreht, so übt dieselbe einen so starken Druck in der Richtung der Achse aus, daß sie die Festigkeit des Holzes überwinden kann, ebenso groß ist aber auch der Widerstand, der Gegendruck des Holzes. Weil demnach die Windungen und das Holz sich fest gegen einander pressen, so entsteht eine so große Reibung, daß die Windungen im Inneren des Holzes fest bleiben, und nur dann zurückkehren, wenn der Gegendruck des Holzes durch eine entgegengesetzte Drehung der Schraube, wodurch sich nämlich der Achsendruck umkehrt, unterstützt wird. Auf dem Drucke in der Richtung der Achse beruht auch die Verwendung der Schraube zu Bohrern, Korkziehern, zur Archimedischen Schnecke (als Pumpe verwendet), zu den außerordentlich zahlreichen Arten von Schraubenpressen, zur Schraubenwinde, besonders aber ihre so wichtige Verwendung zum Fortbewegen der Schiffe als Schiffschraube (erfunden von Ressel 1827 in Triest), an Stelle der Schaufelräder, wodurch nicht nur der Wellenschlag bedeutend vermindert, sondern auch dem wichtigsten Theile des Schiffes eine versteckte Stelle angewiesen wird. — Sind die Windungen der Schraubenspindel genau einander gleich und gleichmäßig geschnitten, so wird für jede Umdrehung die Spindel genau um gleichviel fortbewegt und ebenso für gleiche Bruchtheile einer Umdrehung um gleiche, kleine Strecken fortgeschoben. Die Spindel wird fortbewegt, wenn die Mutter feststitzt, die Mutter dagegen, wenn die Spindel feststitzt. Die letzte Einrichtung ist an vielen Arbeits- oder Werkzeugmaschinen, z. B. zur Verschiebung des Supports an Drehbänken gebräuchlich, die erste an vielen physikalischen Meßapparaten. Sind die Windungen sehr fein, so können mit einer solchen Schraube sehr kleine Bewegungen gemacht und durch die dabei vollbrachte Drehung des Schraubenkopfes dennoch genau gemessen werden; diese Einrichtung nennt man Mikrometerschraube.

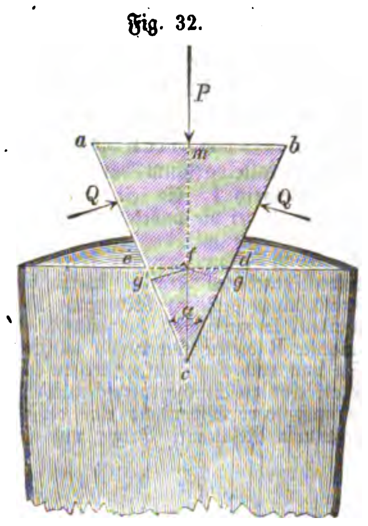
107 Aufg. 132. An welchem Hebelarme muß ein Mann mit einer Kraft von 40^{kg} bei einer Schraube von 2^{cm} Gewindhöhe wirken, um eine Last von 60 Ctr. zu heben? Aufl.: $23{,}9^{cm}$. — A. 133. Welche Gewindhöhe muß eine Schraube haben, damit mit einer Kraft von 40^{kg} an einer Kurbel von 50^{cm} Länge eine Last von 200 Ctr. gehoben werden könne? Aufl.: $1{,}2561^{cm}$. — A. 134. Der Kopf einer Mikrometerschraube sei in 360° getheilt und müsse 20mal gedreht werden, um die Schraube um 1^{cm} fortzubewegen; welche Bewegung erzeugt eine Drehung von 13°? Aufl.: $0{,}01806^{mm}$. — A. 135. Greift eine Schraube h, (Fig. 31) (h bedeute zugleich die Gewindhöhe) in ein Rad R, das auf einer Welle w sitzt, welche die Last Q trägt, so kann eine an der Kurbel k wirkende Kraft P die Last Q mit sehr geringer Anstrengung heben. Wie groß muß diese Kraft P sein, wenn die Buchstaben zugleich die bekannten Dimensionen bedeuten? Aufl.: $P = \frac{w}{R} \cdot \frac{h}{2\pi k} \cdot Q$. Man nennt diese Verbindung von Maschinen-Elementen die Schraube ohne Ende und benutzt sie insbesondere zum Heben von schweren Lasten durch Menschenkraft, an Stellen, wo man nicht leicht mit einer anderen Kraft wirken kann, wie z. B. bei Schleußenaufzügen; dieser Mechanismus hat bei solchen Anwendungen auch den Vortheil, daß er wegen der stattfindenden großen Reibung, sich selbst überlassen, stehen bleibt. Man findet ihn auch häufig bei Werkzeugmaschinen, weil er eine sehr langsame, sanfte und regelmäßige Drehung erzeugt. — A. 136. Das Gesetz der Schraube mittels des Princips der virtuellen Geschwindigkeiten zu beweisen. And.: Bei einer Umdrehung legt die Last den Weg der Gewindhöhe zurück, die Kraft aber ihren ganzen Kreis.

Fig. 31.



108 **6. Der Keil.** Ein Keil ist ein dreiseitig prismatischer Körper, dessen einer Kantenwinkel ein sehr spitzer ist. Die dieser scharfen Kante gegenüber liegende Fläche des Keiles nennt man den Rücken, die anliegenden Flächen die Seiten desselben; oft bezeichnet man mit diesen Namen nicht die Flächen selbst, sondern ihre Schnitte ab und ac oder bc (Fig. 32) durch eine Ebene. Den Keil wendet man an, indem man ihn mit der scharfen Kante in feste Holz- oder Steinmassen treibt, um dieselben zu sprengen oder zwischen andere Holzstücke in der Holzpresse, um zwischen diesen Stücken liegende Stoffe auszupressen (Oelmühlen), man schiebt ihn unter Lasten, um dieselben zu heben; man gebraucht ihn als Meßkeil, um Theile von Meßinstrumenten um sehr wenig zu verschieben. Beim Keile findet Gleichgewicht statt, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Rücken zur Seite des Keiles.

Fig. 32.



Beweis. Ist der Keil durch die Kraft P um fc eingedrungen, so ist die Arbeit der Kraft P.fc; alsdann wurden die 2 auf seine Seiten ausgeübten Pressungen Q um die Wege fg zurückgeschoben, also die Arbeit 2Q.fg consumirt. Nach der allgemeinen Gleichgewichtsbedingung ist daher P.fc = 2Q.fg, woraus P : Q = 2.fg : fc. Da nun △ cfg ∼ cmb, so ist fg : fc = mb : bc und 2.fg : fc = ab : bc. Durch Einsetzung des letzteren Quotienten statt des ersteren in die Proportion für P und Q entsteht P : Q = ab : bc oder P : Q = r : s. — Aus der Proportion P : Q = 2.fg : fc folgt auch P = 2Q (fg : fc) = 2Q sin $\frac{1}{2}\alpha$. Der in der Figur dargestellte Keil, dessen Querschnitt ein gleichschenkeliges Dreieck ist, und für welchen P den gegebenen Werth hat, wird auch doppelter Keil genannt und häuptsächlich zum Sprengen, Spalten und Schneiden benutzt. Zum Heben benutzt man mehr den einfachen Keil, dessen Querschnitt ein rechtwinkeliges Dreieck ist, und für welchen P = Q tang α ist.

Nach obigem Gesetze kann eine Kraft mit einem doppelten Keile um so mehr wirken, je kleiner der Rücken im Verhältnisse zur Seite des Keiles ist. Wir finden daher alle Schneidewerkzeuge, welche mit einer kleinen Kraft meist einen großen Widerstand überwinden sollen, und welche ohne Ausnahme Keile sind, wie Beile, Meißel, Messer, Scheeren u. s. w. mit fast parallelen Seiten an der Schneide versehen; Rasirmesser werden hohl geschliffen; Schiffe und Vögel haben vorn schmale Kiele, um die Widerstände des Wassers und der Luft leichter überwinden zu können.

2. Die Zusammensetzung und die Zerlegung der Kräfte.

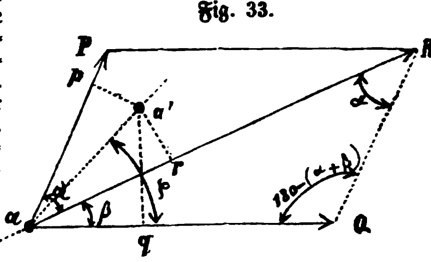
109 **Das Parallelogramm der Kräfte** (Newton 1687). Bisher ließen wir an einer Maschine immer nur eine einzige Kraft der Last entgegen wirken; doch können auch mehrere Kräfte zu demselben Zwecke mit einander verbunden sein. Wenn nun mehrere Kräfte auf einen Körper wirken und sich nicht gerade einander aufheben, so kann das Resultat ihrer Einwirkung nur eine Bewegung sein; diese Bewegung kann man sich meistens auch durch eine einzige Kraft entstanden denken; daher lassen sich mehrere Kräfte durch eine einzige ersetzen. Diejenige Kraft, welche dieselbe Wirkung hervorbringt wie mehrere andere Kräfte, wird die **Mittelkraft** oder **Resultante** jener Kräfte genannt, die im Gegensatze hierzu **Seitenkräfte** oder **Componenten** heißen. Die analytische Mechanik löst allgemein die Aufgabe, die Resultante beliebig vieler und beliebig gerichteter

Kräfte sowohl der Größe als der Richtung nach zu finden. Wir betrachten hier nur einige specielle, aber wichtige Fälle, zunächst den Fall, daß zwei Kräfte unter einem beliebigen Winkel auf einen materiellen Punkt wirken. Bei diesen Betrachtungen stellen wir uns die Kräfte als Linien dar, durch welche wir zugleich die Größe und die Richtung derselben angeben.

Wenn zwei Kräfte unter einem Winkel auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante sowohl der Größe als auch der Richtung nach gleich der Diagonale desjenigen Parallelogramms, das man aus den Seitenkräften construiren kann. Man nennt diesen Satz den Satz vom Parallelogramm der Kräfte.

Beweis 1. Es seien P und Q (Fig. 33) die zwei Kräfte, welche auf den Punkt a wirken; R sei die unbekannte Resultante, α und β die zwei unbekannten Winkel, welche die Resultante mit den beiden Seitenkräften P und Q bildet; die Summe $\alpha + \beta$ dieser Winkel ist bekannt als der Winkel der beiden gegebenen Kräfte. Wenn diese Kräfte einen gewissen Widerstand überwinden, so muß auch die gesuchte Resultante R diesen Widerstand aufheben. Da nun nach dem fünften Axiom jeder Kraft eine gleiche Gegenkraft entspricht, so muß jener Widerstand eine der unbekannten Resultante gleiche und ent-

Fig. 33.



gegengesetzte Kraft R sein; also muß diese Gegenkraft mit den beiden Kräften P und Q im Gleichgewichte stehen; daher muß für diese drei Kräfte das Princip der virtuellen Geschwindigkeiten gelten. Um dasselbe anwenden zu können, geben wir dem System der drei Kräfte eine Verschiebung aa' und fällen dann die Lothe a'p, a'q und a'r auf die Richtungen der drei Kräfte; dann sind ap, aq und ar die Verschiebungen der drei Kräfte in ihren eigenen Richtungen. Multipliciren wir die drei Kräfte mit diesen Verschiebungen, so entsteht nach dem Princip die Gleichgewichtsgleichung

$$R \,.\, ar = P \,.\, ap + Q \,.\, aq \ldots I$$

Bezeichnen wir den Winkel, den die Richtung der Verschiebung $aa' = \varrho$ mit der Kraft Q macht, durch φ, so ist

$$ar = \varrho \cos(\varphi - \beta) = \varrho \cos\varphi \cos\beta + \varrho \sin\varphi \sin\beta$$

dann $aq = \varrho \cos\varphi$ und endlich

$$ap = \varrho \cos(\alpha + \beta - \varphi) = \varrho \cos(\alpha + \beta) \cos\varphi + \varrho \sin(\alpha + \beta) \sin\varphi.$$

Durch Substitution dieser 3 Werthe in die Gleichung I erhält diese die Form

$$R\varrho \cos\varphi \cos\beta + R\varrho \sin\varphi \sin\beta =$$
$$= P\varrho \cos(\alpha + \beta) \cos\varphi + P\varrho \sin(\alpha + \beta) \sin\varphi + Q\varrho \cos\varphi \text{ oder}$$
$$\varrho \cos\varphi \{R \cos\beta - Q - P\cos(\alpha + \beta)\} = \varrho \sin\varphi \{- R \sin\beta + P \sin(\alpha + \beta)\}$$

Weil die Verschiebung eine ganz willkürliche ist, so muß diese Gleichung für jeden beliebigen Werth von ϱ und φ Geltung haben. Dies ist aber nur möglich, wenn die Klammerausdrücke = Null sind, folglich ist

$$- R \sin\beta + P \sin(\alpha + \beta) = 0 \text{ und}$$
$$R \cos\beta - Q - P \cos(\alpha + \beta) = 0$$

Aus der ersten dieser 2 Gleichungen folgt:

$$II \ldots P = R \sin\beta : \sin(\alpha + \beta) \text{ oder } P : R = \sin\beta : \sin(\alpha + \beta)$$

und aus der zweiten, wenn man den Werth von P in diese substituirt:

$$III \ldots Q = R \sin\alpha : \sin(\alpha + \beta) \text{ oder } Q : R = \sin\alpha : \sin(\alpha + \beta)$$

Durch Verbindung dieser 2 Proportionen entsteht die 3 gliedrige Proportion

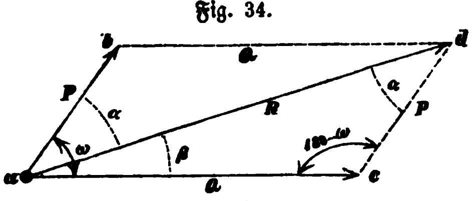
$$P : Q : R = \sin\beta : \sin\alpha : \sin(\alpha + \beta)$$

Ein solches Verhältniß findet nach den Lehren der Trigonometrie nur in einem Dreiecke statt, dessen drei Seiten P, Q und R sind, und in welchem P dem Winkel β und Q dem Winkel α gegenüber liegt. Solche Dreiecke können aber durch unsere Kräfte P, Q und R mit den Winkeln α und β nur entstehen, wenn R die Diagonale eines Parallelo-

gramms ist, dessen Seiten P und Q sind, und wenn diese mit der Diagonale R die Winkel α und β einschließen; hiermit ist dieser Satz bewiesen.

Beweis 2. Es gibt für diesen wichtigen Satz eine große Anzahl von Beweisen. **110** Für den Schüler, dem die Lehren der Trigonometrie noch fremd sind, wollen wir noch einen zweiten Beweis aufführen, welcher einfacher, wenn auch weniger streng als der obige ist. Dieser zweite Beweis beruht zunächst auf einer Folgerung aus dem vierten Axiom: Es ist einerlei, ob zwei Kräfte gleichzeitig oder nach einander wirken, — und dann darauf, daß nach 24. Kräfte durch die Wege dargestellt werden können, welche ein und derselbe Körper in gleichen Zeiten durch den Einfluß der Kräfte zurücklegen würde. Stellt in dieser Weise ab (Fig. 34) die Kraft P und ac die Kraft Q vor, so würde der Punkt a durch P allein in einer gewissen Zeit nach b gelangen und durch Q allein in derselben Zeit nach c. Lassen wir zuerst P allein wirken, so gelangt demnach der Punkt a nach b; lassen wir jetzt Q auf denselben wirken, so wird diese Kraft den Punkt b in derselben Richtung und durch einen gleichen Weg forttreiben, wie sie den Punkt a durch den Weg ac fortbewegte; folglich wird der Punkt b den Weg bd durchlaufen, wobei bd $\#$ ac ist. Es gelangt also der Punkt a an die gegenüberliegende Ecke des Parallelogramms abcd; dahin wäre er aber auch gekommen, wenn eine Kraft von der Größe und Richtung der Diagonale ad auf ihn gewirkt hätte; folglich ist diese diagonale Kraft die Resultante von P und Q.

Fig. 34.



Experimenteller Nachweis. Auch dafür gibt es eine Reihe von Einrichtungen: Eine Trommel, um welche ein Faden mit einem kleinen Gewichte gewunden ist, und welche auf einer erhöhten Fläche fortrollt; man sieht dann das Gewicht den diagonalen Weg durchlaufen. Ein Apparat, ähnlich den Flugmaschinen auf Theatern. Der Crahay'sche Apparat, bestehend aus vier eingetheilten und verstellbaren Holzschienen, mit denen man Parallelogramme von den verschiedensten Seiten und Winkeln bilden kann; an zwei Ecken sind Messingrollen, über welche zwei Schnüre laufen, die von einem Ringe ausgehen, an welchem eine dritte Schnur hängt. Durch Gewichte, welche an den zwei ersten Schnüren gleich den Seiten und an der dritten gleich der Diagonale des Parallelogramms sind, wird immer Gleichgewicht hergestellt.

Algebraischer Ausdruck des Satzes. Nach dem Satze vom Parallelogramm **111** der Kräfte kann man die Resultante sowohl der Größe wie der Richtung nach durch Zeichnung finden; da indessen nur die Rechnung genaue Resultate gibt, so muß man den Satz algebraisch ausdrücken, und zwar ist sowohl die Größe der Resultante R, als auch die Größe der Winkel α und β anzugeben, die sie mit den beiden Componenten P und Q einschließt. Die Größe der Resultante wird berechnet nach der Formel

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (14)$$

und die Winkel werden gefunden nach den Formeln

$$\sin\alpha = \frac{Q\sin\omega}{R} \quad \text{und} \quad \sin\beta = \frac{P\sin\omega}{R} \quad \ldots\ldots\ldots (15)$$

worin $\omega = \alpha + \beta$ den Winkel bedeutet, welchen die Kraftrichtungen einschließen.

Beweis. Schon die Anwendung eines bekannten trigonometrischen Satzes, des sogenannten Cosinus-Satzes auf das $\triangle$ acd (Fig. 34) ergibt $R^2 = P^2 + Q^2 - 2PQ \cos(180 - \omega)$, woraus $R = \sqrt{(P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega)}$.

Jedoch läßt sich dieser Werth auch aus den in 109. gefundenen Gleichungen II und III berechnen: $P = R\sin\beta : \sin(\alpha+\beta)$ und $Q = R\sin\alpha : \sin(\alpha+\beta)$, worin $\alpha + \beta = \omega$ ist. Aus der ersten dieser Gleichungen ist

$$R = P\sin\omega : \sin(\omega - \alpha) = P\sin\omega : (\sin\omega\cos\alpha - \cos\omega\sin\alpha),$$

und aus der zweiten ergibt sich

$$\sin\alpha = Q\sin\omega : R \text{ und } \cos\alpha = \sqrt{(1 - Q^2\sin^2\omega : R^2)} = \sqrt{(R^2 - Q^2\sin^2\omega)} : R$$

Setzt man diese Werthe für $\sin\alpha$ und $\cos\alpha$ in den Werth für R ein, so ergibt sich nach einiger Rechnung ebenfalls $R = \sqrt{(P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega)}$.

Die Formeln (15) für die Winkel lassen sich ebenfalls aus dem $\triangle$acd Fig. 34 mittels des Sinussatzes finden; denn nach diesem Satze ist

$\sin\alpha : \sin(180-\omega) = Q : R$ und $\sin\beta : \sin(180-\omega) = P : R$, woraus
$\sin\alpha = Q \sin\omega : R$ und $\sin\beta = P \sin\omega : R$.
Jedoch ergeben sich dieselben auch direct aus den schon in 109. gefundenen Gleichungen II und III, wenn in denselben ω an die Stelle von $\alpha+\beta$ gesetzt wird.

Mittels dieser algebraischen Ausdrücke lassen sich einige Folgerungen gewinnen, von denen eine allerdings schon aus Axiom 3. geschlossen und implicite im Beweis 109. enthalten ist. Setzt man in Formel (14) den Winkel $\omega = 0$, so findet man für $R = P + Q$ oder

1. **Wenn zwei oder mehrere Kräfte in einer Richtung auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante gleich der Summe derselben.**

Wenn dagegen in Formel (14) $\omega = 180^0$ gesetzt wird, so ergibt sich $R = P - Q$ oder

2. **Wenn zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung auf einen Punkt wirken, so ist die Resultante gleich der Differenz derselben.**

Ist endlich in dem letzten Falle $P = Q$, so ist $R = 0$, d. h.

3. **Gleiche, aber in entgegengesetzter Richtung auf einen Punkt wirkende Kräfte heben sich auf.**

Da $\cos\omega$ zwischen $+1$ und -1 liegt, so sind die 2 Werthe $P+Q$ und $P-Q$ der größte und der kleinste, den die Resultante haben kann, oder

4. **Die Resultante zweier auf einen Punkt wirkenden Kräfte ist (die Grenzfälle ausgenommen) kleiner als die Summe und größer als die Differenz derselben.**

Aus den Formeln (15) folgt, daß $\alpha = \beta$ ist, wenn $P = Q$ ist, daß dagegen $\alpha > \beta$, wenn $P < Q$ und $\alpha < \beta$, wenn $P > Q$ ist.

5. **Die Resultante zweier gleichen Kräfte halbirt den Winkel der Kräfte;** die Resultante ungleicher Kräfte liegt mehr in der Nähe der größeren Kraft.

Wenn auf einen Punkt mehrere Kräfte wirken und deren Resultante gesucht werden soll, so sucht man die Resultante zweier Kräfte, dann die Resultante dieser Resultante und einer dritten Kraft u. s. w. Für drei nicht in einer Ebene wirkenden Kräfte ergibt sich dann, daß die Resultante gleich der Diagonale eines aus den drei Kräften gebildeten Parallelepipedons ist (Fig. 35); für mehrere in einer Ebene wirkenden Kräfte ist dieselbe die letzte Seite eines Polygons (Fig. 36), das dadurch entsteht, daß man durch den Endpunkt der ersten eine Gerade ‖ der zweiten, durch den Endpunkt dieser eine Gerade ‖ der dritten u. s. w. zieht. (Parallelepipedon und Polygon der Kräfte.)

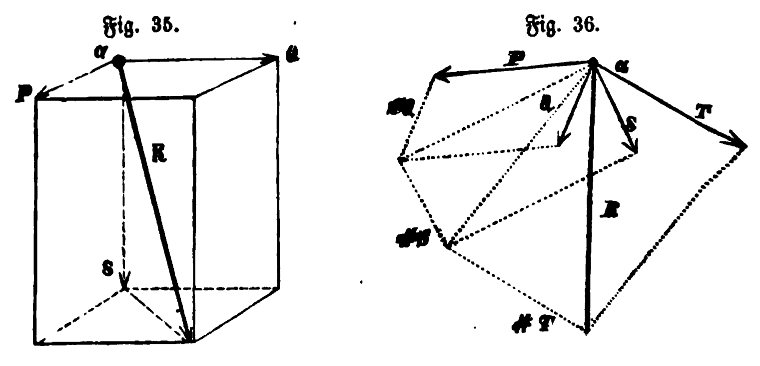
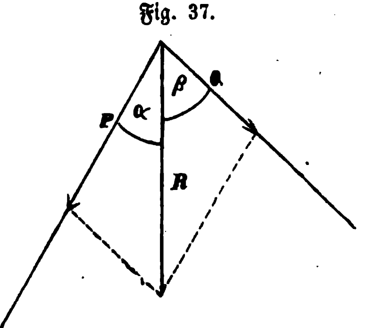


Fig. 35. Fig. 36.

112 **Zerlegung der Kräfte.** Nachdem wir die Zusammensetzung von Kräften kennen gelernt haben, die auf einen Punkt wirken, wollen wir, bevor diese Auf-

gabe für einen Körper uns beschäftigen soll, zuerst die wichtige umgekehrte Aufgabe lösen, nämlich die Zerlegung einer Kraft in zwei Kräfte, die auf denselben Punkt wirken. Gewöhnlich ist hierbei die Richtung dieser Seitenkräfte bekannt und soll daher nur die Größe derselben gefunden werden. Diese Aufgabe ist offenbar nur eine Umkehrung des Parallelogramms der Kräfte. Man findet daher durch Zeichnung (Fig. 37) die Seitenkräfte einer gegebenen Kraft, indem man durch den Endpunkt derselben Parallele zu den gegebenen Richtungen der Seitenkräfte zieht; diese Parallelen schneiden von den Richtungslinien Stücke ab, welche an Größe den Seitenkräften gleich sind.

Fig. 37.



Durch Rechnung findet man dieselben nach den schon gefundenen Formeln

$$P = \frac{R \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad \text{und} \quad Q = \frac{R \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad \ldots\ldots\ldots (16)$$

welche sich aber auch sofort durch Anwendung des bekannten Sinus-Satzes auf eines der beiden Dreiecke finden lassen.

Sollen die beiden Componenten auf einander senkrecht stehen, so ist $\alpha + \beta = 90^0$, daher $Q = R \sin \alpha$ und $P = R \cos \alpha$ . . . . (17)
Da man jede Componente wieder in Seitenkräfte zerlegen kann, so ist die Zerlegung einer Kraft in mehr als zwei Seitenkräfte eine einfache Aufgabe.

113 **Anwendung des Kräfteparallelogramms.** Ein Schiffer wendet es unbewußt an, wenn er mit seinem Kahne eine bestimmte Stelle des gegenüberliegenden Ufers erreichen will. Das Gesetz wird von der Natur selbst ausgeführt, wenn ein Stein von einem Mastbaume oder aus einem Eisenbahnwagen fällt; der Stein fällt in diagonaler Richtung zu Boden. Die Weltkörper schlagen in jedem Augenblicke die diagonale Richtung zwischen den beiden Kräften ein, die auf sie wirken, zwischen ihrer eigenen lebendigen Kraft und der Anziehung eines Centralkörpers. Zahlreich sind insbesondere die Anwendungen der Zerlegung der Kräfte. Wenn ein Körper sich nicht in derjenigen Richtung bewegen kann, in welcher eine Kraft wirkt, so kommt nur die in die Richtung der Bewegung fallende Componente zur Wirkung; umgekehrt kann daher auch eine Kraft in einer anderen Richtung wirken, als in ihrer eigenen, aber nur mit einem Theile ihres Betrages. Diesen Theil findet man, indem man die nach jener Richtung gedachte Componente sucht; ergibt sich dieselbe = Null oder imaginär, so ist die geforderte Wirkung unmöglich; hat sie aber noch einen reellen, wenn auch noch so kleinen Werth, so kann die Kraft noch eine Wirkung in der verlangten Richtung hervorbringen. Soll z. B. eine Kraft einen Druck auf einen Körper ausüben, so muß man sie immer in eine zur Druckfläche senkrechte und eine parallele Componente zerlegen; die letztere geht für den Druck verloren, die erstere gibt die Größe des Druckes an. Soll aber ein Körper auf einer Fläche fortbewegt werden, so geht die zu dieser Fläche senkrechte Druckcomponente für jene Fortbewegung verloren, ja sie erzeugt sogar das Haupthinderniß der Bewegung, die Reibung; nur die zur Fläche parallele Componente erzeugt die Bewegung. Diese Grundsätze sind bei den folgenden Aufgaben anzuwenden; hierbei sind insbesondere die Formeln (17) wichtig.

114 **Aufg. 137.** Welches ist die Resultante zweier auf einander senkrechten Kräfte P u. Q? Aufl.: $R = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$. — A. 138. Welches ist die Resultante von 80^{kg} und 100^{kg}, die einen Winkel von 60^0 einschließen? Aufl.: $R = 156^{kg}$. — A. 139. Welches von 6 und 11^{kg}, die einen Winkel von 30^0 bilden? Aufl.: $R = 16{,}5^{kg}$. — A. 140. Welches sind die Componenten von 100^{kg}, wenn sie Winkel von 30^0 und 60^0 mit der Mittelkraft machen? Aufl.: $P = 50$, $Q = 86{,}5^{kg}$. — A. 141. Welches ist der Druck, den die Last D auf eine schiefe Ebene vom Neigungswinkel α ausübt? Anl.: Man zerlege die Last in eine senkrechte und eine parallele Componente und beweise, daß die erste $D = Q \cos \alpha$ (der Druck), die letzte $Q \sin \alpha$. — A. 142. Das Gesetz von der schiefen Ebene für beide Wir-

tungsarten der Kraft durch das Kräfteparallelogramm zu beweisen. Anb.: Man zerlege die Last für die erste Art, wie es so eben in A. 141 geschehen ist, und für die zweite Art in eine senkrechte und eine wagrechte Componente. — A. 143. Wie groß ist für die zweite Art der Druck auf die schiefe Ebene? Anb.: Gleich der eben gefundenen senkrechten Componente $D = Q \sec \alpha$. Da $\sec \alpha$ immer größer als 1 ist, so ist der Druck immer größer wie die Last; wie ist dies zu erklären; D ist nur in dem Grenzfalle $= Q$, wenn $\sec \alpha = 1$, wenn also $\alpha = 0$. — A. 144. Das Gesetz für den Keil durch das Kräfteparallelogramm zu beweisen. — A. 145. Durch die Kniepresse (Fig. 38) kann auf die Unterlage ab ein sehr großer Druck mittels einer kleinen Kraft P ausgeübt werden; dies zu beweisen. Anb.: Man zerlege P in 2 Componenten in den Richtungen cd und ce, lasse dann den Winkel dce immer größer werden und wiederhole diese Construction, so wird sich herausstellen, daß diese Componenten sogar unendlich werden können. In welchem Falle? — A. 146. Zu zeigen, wie eine fliegende Brücke durch die Stromkraft über den Fluß getrieben werden kann. Anb.: Man zerlege die Stromkraft ab (Fig. 39) in 2 Seitenkräfte, bc senkrecht und ac parallel zu der Brücke; die senkrechte Componente bc kommt allein zur Wirkung. Diese zerlege man in eine Kraft cd, parallel zu dem Strome, und eine Kraft bd, senkrecht zu dem Strome; durch die letztere ist die Ueberfahrt möglich. — A. 147. In ähnlicher Weise (Fig. 40) zu zeigen, daß man auf der See durch Anwendung von Segeln nach allen Richtungen, nur nicht gerade dem Winde entgegen, fahren kann (Kreuzen). Auch bei den Windmühlen wirkt die Kraft in ähnlicher Weise, sowie bei dem Spieldrachen (Windvogel) der Knaben, beim schiefen Stoße des Wassers gegen Räderschaufeln und Steuerruder u. s. w. — A. 148. Wie groß ist die wirksame Componente der Windkraft R, wenn die Bezeichnungen von Fig. 40 gelten? Aufl.: $P = R \sin \beta \sin \alpha$; sind α und β nur $= 30^0$, so ist P immer noch $= \frac{1}{4}$ R. — A. 149. Wie groß ist die Kraft P, welche bei beliebiger Richtung einen Körper vom Gewichte Q mit Ueberwindung der Reibung auf einer schiefen Ebene aufwärts zu ziehen vermag? Anb.: Man zerlege sowohl R wie P in Componenten, parallel und senkrecht zu der schiefen Ebene; die senkrechten Componenten bilden den Druck, der mit f, dem Reibungscoëfficienten multiplicirt die Reibung gibt. Diese und die parallele Componente von Q müssen zusammen der parallelen Componente von P gleich sein (Fig. 41). Hieraus folgt $P = Q(\sin \alpha + f \cos \alpha) : (\cos \beta + f \sin \beta)$. Bei wagrechter Richtung von P ist $\beta = -\alpha$, folglich ist dann $P = Q (f + tg\, \alpha) : (1 - f\, tg\, \alpha)$. — A. 150. Hat man eine drehbare schiefe Ebene, die man unter beliebigem Neigungswinkel aufstellen kann, so ist es nach Amonton möglich, den Reibungscoëfficienten f für den Uebergang aus Ruhe in Bewegung zu finden, da im Beginne der Bewegung die Reibung gleich der parallelen Componente der Last ist; wie groß ist der Coëfficient f? Aufl.: $fQ \cos \varphi = Q \sin \varphi$; hieraus $f = tg\, \varphi$; φ wird

Fig. 38.

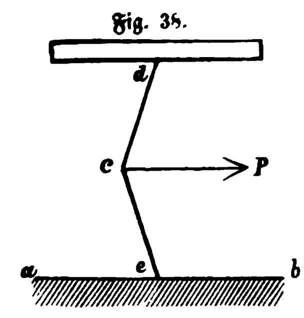


Fig. 39.

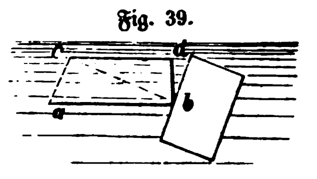


Fig. 40.

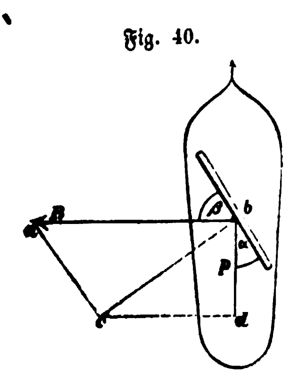
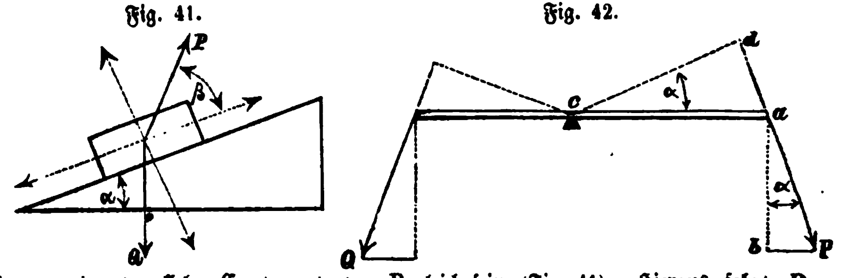


Fig. 41. Fig. 42.



Reibungswinkel genannt. — A. 151. Wie groß ist die Kraft zur Ueberwindung der Last Q und der Reibung bei der Schraube? Aufl.: Hier gilt die letzte Formel in A. 149. Man kann in derselben $h : 2r\pi$ statt $\mathrm{tg}\,\alpha$ setzen. — A. 152. Das Hebelgesetz für beliebig gerichtete Kräfte zu beweisen. Anl.: Man suche (Fig. 42) z. B. die senkrechte Componente ab von P; sie ist $P \cos\alpha$; das Moment derselben ist $P \,.\, ac \,.\, \cos\alpha = P \,.\, cd$, gleich dem Momente von P selbst.

115 **Resultante von Kräften, die auf einen Körper wirken.** Wir betrachten hier nur den Fall, daß die Kräfte einander parallel sind, und daß auch die Resultante den Seitenkräften parallel sein soll. Zunächst suchen wir die Resultante von zwei parallelen Kräften. In diesem Falle muß nicht blos die Größe der Resultante gefunden werden, sondern auch derjenige Punkt, an welchem die Resultante angebracht werden müßte, um dieselbe Wirkung wie die Seitenkräfte hervorbringen zu können; dieser Punkt heißt der Angriffspunkt der Resultante. Wenn nun, wie vorausgesetzt, die Resultante dieselbe Richtung wie die Seitenkräfte haben soll, so gilt folgender Satz: Die Resultante zweier parallelen Kräfte ist gleich der Summe derselben; der Angriffspunkt der Resultante theilt die Verbindungsgrade der Angriffspunkte der Kräfte in zwei Stücke, die sich umgekehrt verhalten wie die gegebenen Kräfte.

Beweis. Es seien (Fig. 43) P und Q die beiden auf die Punkte a und b wirkenden Kräfte. Zum Zwecke des Beweises bringen wir in a und b zwei gleiche, aber entgegengesetzte Kräfte S an. Da diese einander aufheben, so ist die Resultante der vier Kräfte P, S, Q und S auch die Resultante von P und Q. Die Resultante von P und S ist nach dem Kräfteparallelogramm = ad, die von S und Q = bf. Wenn wir die Resultante von ad und bf gefunden haben, so haben wir auch die von P und Q. Nun darf man aber nach dem dritten Axiom den Angriffspunkt jeder Kraft in ihrer eigenen Richtung verlegen; die Wirkung von ad und bf wird also dieselbe bleiben, wenn wir diese Kräfte auf den unveränderlich mit ab verbundenen Punkt g wirken lassen. Es sei gh die an den Punkt g verlegte Kraft ad und gi die verlegte Kraft bf. Um die Resultante dieser beiden Kräfte zu finden, zerlegen wir gh nach dem Kräfteparallelogramm in zwei Componenten, parallel zu ab und zu P; die erste Componente gl muß dann = S, die zweite gk = P sein; ebenso zerlegen wir gi in gn = S und gm = Q. Die beiden Kräfte S heben einander auf, weil sie einander gleich und entgegengesetzt sind; die beiden Kräfte gk und gm wirken nach einer Richtung auf einen Punkt, folglich ist ihre Resultante gleich ihrer Summe P + Q. Hiermit ist der erste Theil des Lehrsatzes bewiesen. Für den zweiten Theil benutzen wir die Aehnlichkeit der Dreiecke ghk und gac, sowie der Dreiecke gmi und gcb; hieraus ergeben sich folgende zwei Proportionen: $gk : hk$ oder $P : S = gc : ac$, woraus $S \,.\, gc = P \,.\, ac$ und $gm : mi$ oder $Q : S = gc : bc$, woraus $S \,.\, gc = Q \,.\, bc$. Durch Gleichsetzung der zwei letzten einander gleichen Werthe erhalten wir $P \,.\, ac = Q \,.\, bc$ oder $P : Q = bc : ac$, womit auch der zweite Theil des Lehrsatzes bewiesen ist.

Fig. 43.

Vermittels dieses Satzes kann man eine auf einen Körper wirkende Kraft in zwei derselben parallele Seitenkräfte zerlegen, deren Summe indeß immer der gegebenen Kraft gleich sein muß. Außerdem ergibt sich aus demselben, daß die parallele Resultante vieler parallelen Kräfte gleich der Summe derselben ist; den Angriffspunkt dieser Resultante findet man, indem man zuerst nach dem Lehrsatze den Angriffspunkt der Resultante zweier Kräfte sucht, dann diesen Punkt mit dem Angriffspunkte der dritten Kraft verbindet und wieder nach dem Satze den Angriffspunkt der Resultante jener ersten Resultante und der dritten Kraft sucht; dann hat man den Angriffspunkt der Resultaute dreier Kräfte. Fährt man in dieser Weise fort, so findet man den Angriffspunkt der Resultante vieler parallelen Kräfte, die auf einen Körper wirken.

Den Angriffspunkt der Resultante mehrerer parallelen Kräfte nennt man den **Mittelpunkt der parallelen Kräfte**; derselbe hat folgende zwei aus seiner Definition hervorgehende Eigenschaften: 1. **Bringt man im Mittelpunkt der parallelen Kräfte eine Kraft gleich der Summe derselben an, so hat diese dieselbe Wirkung wie alle Seitenkräfte zusammen.** 2. **Wenn man in dem Mittelpunkte der parallelen Kräfte eine Kraft anbringt, welche der Resultante gleich, aber entgegengesetzt ist, so werden alle Seitenkräfte dadurch aufgehoben.** Diese Eigenschaft hat nur der Mittelpunkt der parallelen Kräfte.

116 Aufg. 153. An den beiden Enden einer Stange von 3m Länge wirken parallele Kräfte von 87 und 57kg; wie groß ist die Resultante und wo muß sie angebracht werden? Aufl.: R = 144kg; ist der Abstand der Resultante von der ersten Kraft = x, also von der zweiten = 3 — x, so ergibt sich 87 : 57 = 3 — x : x oder 144 : 57 = 3 : x, woraus x = 1$^{3}/_{16}$m. — A. 154. An beiden Enden einer 4m langen Stange wirken parallele Kräfte von 100 und 50kg; wo ist der Angriffspunkt der Resultante? Die beiden Abstände müssen sich wie 1 : 2 verhalten, sind also 1$^{1}/_{3}$ und 2$^{2}/_{3}$m. — A. 155. Welches sind allgemein die beiden Theile a und b einer Stange von der Länge l, an deren Ende die parallelen Kräfte P und Q wirken? Aufl.: Nach der Methode in A. 153 ist a = l.Q : (P + Q) und b = l P : (P + Q). A. 156. Das Hebelgesetz mittels der Sätze in 115. zu beweisen. Anl.: In dem Angriffspunkte der Resultante bringt man eine der Resultante gleiche, aber entgegengesetzte Kraft an, nämlich die Festigkeit einer Stütze; dann muß Gleichgewicht stattfinden. — A. 157. Wo liegt die Resultante zweier gleichen, parallelen, aber in entgegengesetzter Richtung auf eine Linie wirkenden Kräfte? Aufl.: Nimmt man P positiv, so muß man Q negativ nehmen; es sind dann die beiden Theile der Linie gleich — Ql : (P—Q) und Pl : (P—Q), welche Werthe für P = Q unendlich groß sind, während dann die Resultante P—Q selbst = Null ist. Dieses parador erscheinende Resultat, daß die Resultante Null im Unendlichen anzubringen sei, bedeutet, daß ein Kräftepaar (couple), wie Poinsot zwei parallele, gleiche und entgegengesetzte Kräfte nennt, keine Resultante hat, also nicht durch eine einzige Kraft ersetzt oder aufgehoben werden kann. — A. 158. Zwei Arbeiter tragen an einer Stange 75kg; der eine ist zweimal so weit von der Last entfernt, wie der andere; wie viel hat jeder zu tragen? Aufl.: 25kg; 50kg. — A. 159. Zwei Leute tragen an einer Stange 90kg; der eine soll nur 10, der andere 80kg tragen; wie ist dies einzurichten? Aufl.: Der letztere muß der Last 8mal näher sein als der erstere; folglich muß die Last in $^{1}/_{9}$ der Stange bei dem letzten Arbeiter angehängt werden. — A. 160. Dieselbe Aufgabe allgemein zu lösen. Aufl.: Die beiden Theile der Stange sind Ql : R und Pl : R, wo R = P + Q. — A. 161. Die Last R ist von beiden Enden um a und b entfernt; wie groß sind P und Q? Aufl.: P = b R : (a + b) und Q = a R : (a + b). — A. 162. Die gewichtlose Stange l (Fig. 44) ist gegen eine Wand unter dem Winkel α gestellt und

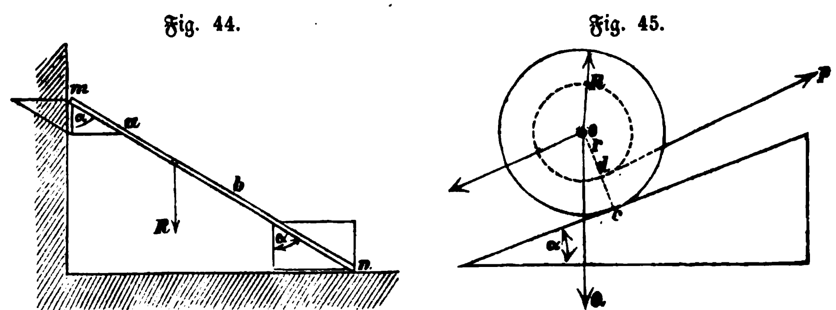


Fig. 44. Fig. 45.

trägt in den Abständen a und b von den beiden Enden die Last R. Welchen Druck übt dieselbe gegen Wand und Boden aus, und mit welcher Schubkraft strebt sie an Wand und Boden hinzugleiten? Aufl.: Verticalschub bei m = b R : l; Druck in der Stabrichtung bei m = b R : l cos α; Druck gegen die Wand bei m = b R sin α : l cos α = b R tang α : l; Verticaldruck bei n = b R cos α : l cos α + a R : l = R; endlich Horizontalschub bei n gleich dem Horizontaldruck bei m = b R tang α : l. — A. 163. **Experiment von Kommerell in Tübingen (1868).** Um eine Walze r, die mit größeren Endscheiben R (Fig. 45) auf einer schiefen Ebene liegt, ist eine Schnur so gewunden, daß das freie Ende derselben an

der unteren Seite der Walze die schiefe Ebene hinaufgeht. Welche Kraft muß an dieser Schnur wirken, um das Gewicht Q der Walze und die Reibung zu überwinden? Aufl.: Die parallele Componente von Q ist $Q \sin \alpha$, die Reibung $f Q \cos \alpha$. Damit diese zwei parallelen nach unten wirkenden Kräfte durch die bei d nach oben wirkende Kraft im Gleichgewicht gehalten werden können, muß nach 115. sein $od . Q \sin \alpha = cd . f Q \cos \alpha$, woraus $tg \alpha = f . od : od = f (R-r) : r$. Wenn α diese Größe hat, und wenn $P = Q \sin \alpha + f Q \cos \alpha$, so findet Gleichgewicht statt. Wenn dagegen α kleiner oder P größer wird, so rollt die Walze die schiefe Ebene hinauf, im umgekehrten Falle hinab. Dieses Experiment ist eine Abänderung des bekannten Joujou-Spieles.

Der Schwerpunkt. (Archimedes, 200 v. Chr.)

117 Von der Einwirkung vieler parallelen Kräfte auf einen Körper gibt uns die Natur selbst ein Beispiel, nämlich die Anziehung aller Atome eines Körpers durch die Erde. Diese anziehenden Kräfte sind bekanntlich alle nach dem Mittelpunkte der Erde gerichtet, weichen also bei den Körpern auf der Erdoberfläche so wenig von einander ab, daß man sie als parallel ansehen muß. **Den Mittelpunkt aller dieser parallelen Schwerkräfte eines Körpers nennt man den Schwerpunkt.** Dieser Punkt hat folgende Eigenschaften:

1. **In dem Schwerpunkte eines Körpers kann man sich das ganze Gewicht desseben vereinigt denken.** Denn die Wirkung aller Schwerkräfte ist nach dem 1. Satze über den Mittelpunkt paralleler Kräfte genau dieselbe, wie die Wirkung ihrer Resultante d. h. des Gewichtes, wenn man diese Resultante in ihrem Angriffspunkte d. i. im Schwerpunkte anbringt. — Will man daher das statische Moment eines Körpergewichtes finden, so muß man den Abstand des Schwerpunktes dieses Körpers in Rechnung ziehen. Der Schwerpunkt ist auch der Mittelpunkt anderer parallelen Kräfte; der Angriffspunkt der Resultante irgend welcher parallelen, gleichen und gleichmäßig vertheilten Kräfte ist daher in dem Schwerpunkte zu suchen.

2. **Wird der Schwerpunkt eines Körpers unterstützt, so ruht der Körper;** ist der Schwerpunkt nicht unterstützt, so fällt der Körper. Denn alle Schwerkräfte werden aufgehoben, oder das ganze Gewicht wird getragen, wenn in dem Mittelpunkte dieser Kräfte eine Kraft angebracht wird, welche der Resultante gleich und entgegengesetzt ist, nach dem 2. Satze über den Mittelpunkt paralleler Kräfte. Wenn demnach in dem Schwerpunkte die Festigkeit einer Stütze, welche ja nach dem fünften Axiom einen dem Gewichte gleichen Gegendruck ausübt, angebracht wird, so muß der Körper ruhen. Unterstützt ist der Schwerpunkt, wenn vertical über oder unter demselben eine feste Verbindung mit der Erde hergestellt ist, also auch, wenn ein durch denselben gehendes Loth noch in der Grundfläche des Körpers einmündet.

Experimentelle Nachweise für diese Sätze sind: Platten von verschiedenen Formen, die an ihren Schwerpunkten eine kleine Pfanne haben, mit der man sie auf Spitzen hängt. Die chinesischen Purzelmänner, der Mann mit der Säge, der schottische Dreher. Schiefe Körper wie die Thürme zu Pisa und Bologna, fallen nicht, wenn das durch den Schwerpunkt gehende Loth noch in der Grundfläche eintrifft. Beim Tragen von Lasten biegen wir uns so, daß der durch die Last verschobene Schwerpunkt wieder senkrecht über die von den Füßen begrenzte Stützfläche fällt. Ist ein anderer Punkt als der Schwerpunkt unterstützt, so dreht sich derselbe, bis er in der tiefsten Lage, senkrecht unter dem Stützpunkte ist: berganlaufender Kegel, berganlaufende Schachtel, Stehaufmännchen, falsche Würfel.

118 **Bestimmung des Schwerpunktes.** Der Bestimmungssatz des Schwerpunktes lautet: **Das statische Moment des in dem Schwerpunkte vereinigt gedachten Körpergewichtes ist gleich der Summe der statischen Momente aller Gewichte der einzelnen Körpertheile in Bezug auf dieselbe Drehachse.** Statt der Gewichte können in diesem Satze auch

die Massen gesetzt werden, und da bei homogenen Körpern die Massen den Rauminhalten proportional sind, so können bei solchen Körpern die Volumina an die Stelle der Gewichte gesetzt werden.

Beweis. Denken wir uns einen Körper um irgend eine Achse außerhalb seines Schwerpunktes drehbar, so beschreibt bei einer vollständigen Umdrehung jeder Punkt einen Kreis, dessen Radius die senkrechte Entfernung des Punktes von der Drehachse ist; der Weg aber, den jeder einzelne Punkt in der Richtung der hier in Rede stehenden Kraft, der Schwerkraft, also in lothrechter Richtung, zurücklegt, ist zweimal der Durchmesser dieses Kreises. Bezeichnen wir das im Schwerpunkt vereinigt gedachte ganze Körpergewicht mit P und den Abstand desselben von der Drehachse mit R, so ist die Arbeit des ganzen Körpergewichtes $= 4PR$; bezeichnen wir die Gewichte der einzelnen Massenpunkte oder auch der einzelnen Körpertheile mit $p, p', p'' \ldots$, und ihre Abstände oder auch die Abstände ihrer Schwerpunkte von der Drehachse mit $r, r', r'' \ldots$, so sind die Arbeiten der einzelnen Gewichte $4pr$, $4p'r'$, $4p''r''$ u. s. w. Nach der ersten Eigenschaft des Schwerpunktes ist aber die Wirkung also auch die Arbeit des im Schwerpunkte vereinigt gedachten Gewichtes gleich der Summe der Wirkungen, also auch gleich der Summe der Arbeiten der Gewichte der einzelnen Körpertheile, folglich

$$4PR = 4pr + 4p'r' + 4p''r'' + \ldots$$

woraus

$$PR = pr + p'r' + p''r'' + \ldots$$

Bekanntlich wird nun das Product einer Kraft mit dem Abstande ihres Angriffspunktes von einer Drehachse statisches Moment genannt; also sagt die letzte Gleichung aus, daß das statische Moment des ganzen Körpergewichtes gleich ist der Summe der statischen Momente der einzelnen Körpertheile. Für homogene Körpergewichte ergibt sich, indem wir einfach jedes einzelne p durch das specifische Gewicht dividiren

$$VR = vr + v'r' + v''r'' + \ldots,$$

Nach diesem Satze wird die Lage des Schwerpunktes eines Körpers bestimmt, indem man eine beliebige Gerade als Drehachse annimmt und die statischen Momente der einzelnen Körpertheile in Bezug auf dieselbe aufsucht; da ein Körper aus unendlich vielen Molekülen besteht, so sind zur vollständigen Durchführung der Summirung aller dieser Momente die Mittel der Infinitesimalrechnung erforderlich; indessen sind in manchen Fällen nur die Momente einzelner Körpertheile zu summiren, wie die folgenden Aufgaben zeigen werden; diese Summe wird dann gleich dem Producte des ganzen Körpers mit dem unbekannten Abstande des Schwerpunktes von der Drehachse gesetzt, wodurch eine Gleichung entsteht, aus welcher dieser Abstand gefunden werden kann. — Dreht man einen Körper um eine beliebige Drehachse, so ändern sich weder sein Gewicht, noch die Abstände von der Drehachse; folglich bleibt auch die Lage des Schwerpunktes nach dem Bestimmungssatze dieselbe. *Die Lage des Schwerpunktes eines Körpers ist demnach unabhängig von der Lage des Körpers und nur bedingt von der Form desselben.*

Aus dem Bestimmungssatze folgt auch die zweite Eigenschaft des Schwerpunktes. Wenn nämlich der Schwerpunkt in der Drehachse oder im Stützpunkte liegt, so ist der Abstand desselben von dem Stützpunkte, und demnach das Moment des ganzen Körpers gleich Null; folglich ist auch die zweite Seite der Gleichung, die Summe der statischen Momente aller Körpertheile gleich Null, d. h. es findet nach dem Hebelgesetze Gleichgewicht statt, der Körper ruht, wenn der Schwerpunkt unterstützt ist.

Diese Folgerung aus dem Bestimmungssatze gibt uns die Möglichkeit, für zahlreiche einfache Körper und dadurch nach dem Bestimmungssatze auch für weniger einfache Körper den Schwerpunkt mit den Mitteln der elementaren Mathematik zu bestimmen. Damit nämlich die Summe der statischen Momente eines im Schwerpunkte unterstützten Körpers gleich Null sei, muß zu jedem materiellen Punkte auf der einen Seite des Schwerpunktes ein genau gleich weit entfernter schwerer Punkt auf der anderen Seite vorhanden sein, der durch sein negatives statisches Moment das positive des ersten Punktes aufhebt; dies ist nur dann der Fall, wenn der Schwerpunkt genau in der Mitte liegt, wobei indeß die Homogenität überall vorausgesetzt werden muß; folglich liegen die Schwerpunkte der regelmäßigen Körper, der regelmäßigen schweren Flächen, der materiellen Linie in den Mittelpunkten. Die gerade Linie, der Kreis, die regelmäßigen Vielecke, die Kugel, die regelmäßigen Körper, die Ringe haben ihren Schwerpunkt in ihrem Mittelpunkte, Walzen, regelmäßige Prismen, Rotationskörper, die aus 2 gleichen Hälften bestehen, in der Mitte ihrer Achsen, Parallelogramme und Parallelepipeda im Schnitte ihrer Diagonalen. Der Schwerpunkt eines Dreiecks muß in jeder Transversalen liegen, weil jede Transversale eine Gegenseite und alle zu dieser parallelen Dreieckslinien halbirt; folglich liegt der Schwerpunkt eines Dreiecks im Schnittpunkte der Transversalen, welcher bekanntlich um $\frac{1}{3}$ der Transversalen von ihrem Fußpunkte entfernt ist.

119

Aufg. 164. Schwerpunkt einer Pyramide und eines Kegels. Zieht man in der dreiseitigen Pyramide (Fig. 46) die Transversalen cf und df zweier Seitenflächen, so liegen die Schwerpunkte dieser Dreiecke in den Punkten g und h, für welche $gf = \frac{1}{3} cf$ und $hf = \frac{1}{3} df$. Hieraus folgt, daß $gh \parallel cd$ ist. Der Schwerpunkt der Pyramide muß in der Linie dg liegen; denn diese Linie geht durch die Schwerpunkte aller zu abc parallelen Dreiecke, welche man sich bis zur Spitze hin immer kleiner werdend und die ganze Pyramide ausfüllend denken kann. Ebenso muß der gesuchte Schwerpunkt in der Geraden ch liegen. Diese zwei Geraden dg und ch müssen sich einander schneiden, weil sie sich in der Ebene des Dreiecks cfd befinden. Folglich muß der Schwerpunkt der Pyramide in dem Schnitte s dieser beiden Linien liegen. Es ergibt sich nun leicht aus der Aehnlichkeit der Dreiecke, daß $gs = \frac{1}{3} sd$ also $= \frac{1}{4} gd$ ist. Man findet demnach den Schwerpunkt einer dreiseitigen, wie auch jeder anderen Pyramide und jedes Kegels, indem man die Spitze mit dem Schwerpunkte der Grundfläche verbindet und von dieser Linie $\frac{1}{4}$ vom Fußpunkte aus abschneidet. — **A. 165. Schwerpunkt eines Pyramiden- und eines Kegelstumpfes.** Denken wir uns durch den Schwerpunkt a der Grundfläche (Fig. 47) eine Drehachse gelegt, so muß die Summe der statischen Momente des Stumpfes und der Ergänzungsspitze nach dem Bestimmungssatze gleich dem statischen Moment der ganzen Pyramide sein. Sind g, g′ u. g″ die Volumina des Stumpfes, der ganzen Pyramide und der Spitze, und s, s′ und s″ bezüglich die Schwerpunkte derselben, so muß demnach sein: $g \cdot as + g'' \cdot as'' = g' \cdot as'$. Wenn wir nun zwei homologe Seiten der beiden Grundflächen mit k und k′ bezeichnen, so ist $g'' = \frac{k'^3}{k^3} g'$ und $g = \left(1 - \frac{k'^3}{k^3}\right) g'$, woraus durch Substitution in die Bedingungsgleichung entsteht $\left(1 - \frac{k'^3}{k^3}\right) \cdot as + \frac{k'^3}{k^3} \cdot as'' = as'$. Setzen wir die Verbindungslinie der Schwerpunkte der beiden Grundflächen $ab = h$, und bedenken, daß $ac : bc = k : k'$ oder $ac - bc : bc = k - k' : k'$ oder $bc = \frac{hk'}{k-k'}$, so ergibt sich $as' = \frac{1}{4} ac = \frac{1}{4}\left(h + \frac{hk'}{k-k'}\right) = \frac{1}{4} \cdot \frac{hk}{k-k'}$, und $as'' = h + \frac{1}{4} \cdot \frac{hk'}{k-k'} = \frac{h}{4} \cdot \frac{4k-3k'}{k-k'}$. Wenn wir diese Werthe für as′ und as″ in die Bedingungsgleichung substituiren, so entsteht nach einiger Rechnung

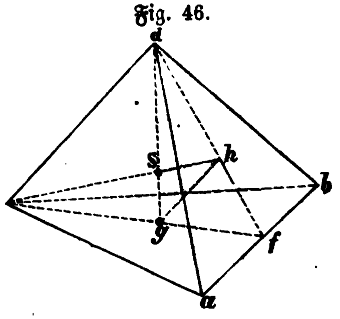


Fig. 46.

Fig. 47.

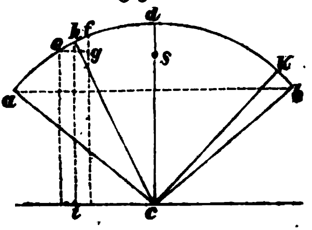
$$as = \frac{h}{4} \cdot \frac{k^4 - 4kk'^3 + 3k'^4}{(k-k')(k^3-k'^3)} = \frac{h}{4} \cdot \frac{k^2 + 2kk' + 3k'^2}{k^2 + kk' + k'^2}$$

Sind r und r′ die Grundflächenradien eines Kegelstumpfes, so ist

$$as = \frac{h}{4} \cdot \frac{r^2 + 2rr' + 3r'^2}{r^2 + rr' + r'^2}$$

A. 166. Schwerpunkt eines Kreisbogens. Der Schwerpunkt des Bogens adb (Fig. 48) liegt auf dem mittleren Radius cd. Um die Entfernung cs desselben von dem Mittelpunkte c und der durch denselben gedachten Drehachse zu finden, benutzen wir den Bestimmungssatz. Diesem gemäß muß, wenn α die Länge des Bogens ist, das Product $\alpha \cdot cs$ gleich der Summe der Momente der einzelnen Bogen-Elemente sein. Das Moment des Bogen-Elementes ef ist $ef \cdot hi$ oder $ch \cdot eg = r \cdot eg$. Daraus folgt, daß die Momentensumme $= r \cdot ab$ ist, und daß daher die Gleichung stattfindet $\alpha \cdot cs = r \cdot ab$, woraus $cs = r \cdot ab : \alpha$ oder $= rm : \alpha$, wenn wir die Sehne ab mit m bezeichnen. — A. 167.

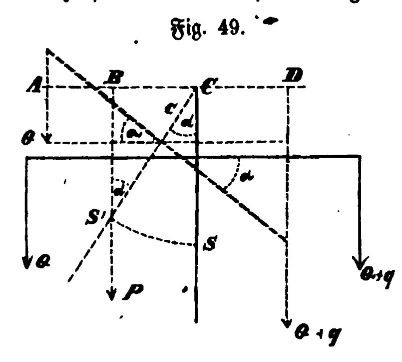
Fig. 48.



Zustande mit Stabilität wagrecht hängen; dies ist nach 120. der Fall, wenn der Schwerpunkt des Wagbalkens unter dem Stützpunkte liegt. 2. Sie muß richtig sein, d. h. die Meßgewichte müssen wirklich das Gewicht der Last angeben; dies ist der Fall, wenn die 2 Hälften des Wagbalkens gleiche Länge und gleiche statische Momente haben, d. h. sowohl nach Form, als Gewicht einander gleich sind, und wenn auch die 2 Wagschalen mit den Ketten oder Schnüren gleich viel wiegen. 3. Sie muß empfindlich sein, d. h. die Zunge muß schon bei einem sehr kleinen Uebergewichte auf der einen Seite einen großen Ausschlag geben. Man mißt die Empfindlichkeit durch denjenigen Theil des Gewichtes, welcher noch einen Ausschlag hervorbringt und verlangt für die physikalischen Wagen eine Empfindlichkeit von $^1/_{60000}$. Die Empfindlichkeit einer Wage ist um so größer, a. je näher der Schwerpunkt dem Stützpunkte liegt. Denn würde der Schwerpunkt in den Stützpunkt fallen, so wäre indifferentes Gleichgewicht, und das geringste Uebergewicht müßte den Wagbalken zum verticalen Umschlagen bringen; eine solche Wage wäre demnach übertrieben empfindlich und würde der ersten Bedingung nicht genügen; liegt aber der Schwerpunkt möglichst nahe unter dem Drehpunkte, so ist die stabile Lage gewahrt und die Empfindlichkeit möglichst groß gemacht, weil dann der Schwerpunkt beim Ausschlagen den kleinsten Bogen beschreibt, und demnach das Uebergewicht die kleinste Arbeit zu vollbringen hat. b. Je länger der Wagbalken ist; denn das den Ausschlag erzeugende Uebergewicht kann um so kräftiger wirken, an je längerem Hebelarme es wirkt. c. Je leichter der Wagbalken und die Wagschalen sind; denn je geringer die Masse ist, welche durch das Uebergewicht bewegt werden soll, desto größer kann der Ausschlagweg sein, den diese Masse zurücklegt. d. Je geringer die Widerstände sind. Deßhalb ist bei feinen Wagen die Drehachse von Stahl und ruht mittelst einer scharfen Schneide auf Stahl oder Achat, deßhalb sind auch die Aufhängehaken mit steinernen Schneiden versehen; deßhalb wird mittels eines von außen drehbaren Rädchens, das eine Stange und zwei daran befestigte Arme hebt, der Wagbalken nach dem Gebrauche aus seinem Stützpunkte gehoben.

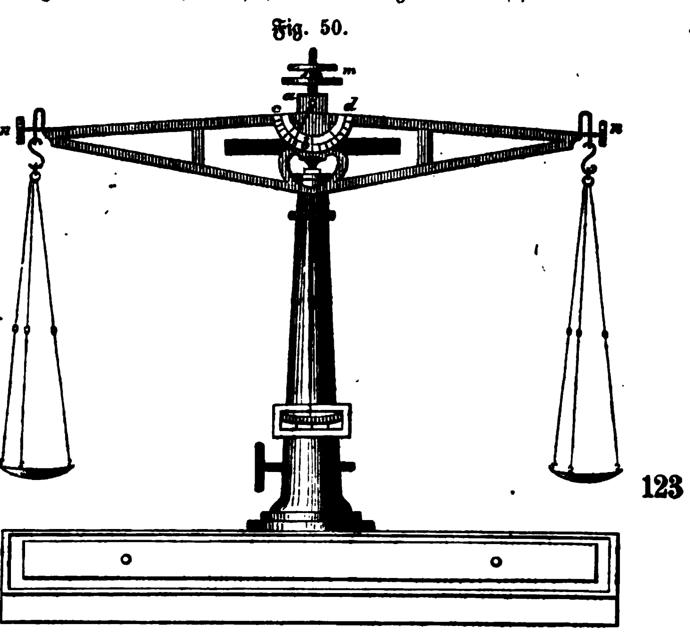
122 Aufg. 177. Die Bedingungen der Empfindlichkeit mathematisch aufzufinden. Aufl.: Es bezeichne P das Gewicht des Wagbalkens, a die halbe Länge desselben, b den Abstand des Schwerpunktes S vom Stützpunkt C, c den Abstand der Verbindungslinie der beiden Aufhängepunkte von dem Stützpunkt, Q die beiderseits gleiche Last und q das Uebergewicht auf der einen Seite, so nimmt die Zunge CS durch dieses Uebergewicht die Lage CS′ (Fig. 49) an und legt demnach den Ausschlagwinkel α zurück. Nach dem Hebelgesetze ist dann die Bedingung des Gleichgewichtes $(Q + q) CD = Q . AC + P . BC$ oder $(Q + q)(a \cos\alpha - c \sin\alpha) = Q (a \cos\alpha + c \sin\alpha) + Pb \sin\alpha$, woraus $\tang\alpha = aq : (bP + c(2Q + q))$. Die Bedingungen, unter welchen dieser Bruch seinen größten Werth erhält, sind auch die Bedingungen der Empfindlichkeit. — A. 178. Wie prüft man die Richtigkeit einer Wage? Antw.: Durch Vertauschung zweier Gleichgewicht herstellenden Massen. — A. 179. Wie kann man mit einer unrichtigen Wage richtig wiegen? Antw.: Man tarirt den Körper durch Schrot oder Sand und ersetzt ihn dann durch Gewichte (Bordas Doppelwägung). — A. 180. Auf der Weltausstellung von 1867 hatte Horn aus Berlin eine Wage aufgestellt, die bei 1kg Belastung noch 0,1mg angab, und Sacré aus Brüssel eine große Präcisionswage für 5kg Belastung, die noch bei 0,5mg Uebergewicht einen Ausschlag gab. Welches war die Empfindlichkeit dieser Wagen? Aufl.: $^1/_{10\,000\,000}$. — A. 181. Die letzte Genauigkeit erzielte man früher durch einen Reiter aus feinstem Platindraht (nach Berzelius), der auf verschiedene Stellen des graduirten Wagbalkens gesetzt wurde.

Fig. 49.



Auf der Pariser Ausstellung von 1867 hatte statt dessen der Präcisionsbogen (nach Gallois) vielfache Aufnahme gefunden. In der Mitte des Wagbalkens ist ein drehbares Stäbchen ab (Fig. 50) angebracht; das je nach seiner Stellung einen verschiedenen Gewichtswerth angibt, welcher auf dem Präcisionsbogen cd abzulesen ist. Welchen Vorzug hat diese Einrichtung? Wozu dienen die schweren Eisenplatten, welche jetzt das Fundament der feinen französischen Wagen bilden? — A. 182. Welchen Zweck haben die Schrauben m u. n (Fig. 50)? Antw.: m dient zur Veränderung des Schwerpunktes und n zu Correcturen der Länge. Der Lernende suche alle diese Antworten zubegründen.

Fig. 50.



123

Zum raschen Wiegen kleinerLasten dient die Zeigerwage; dieselbe ist ein Winkelhebel, dessen einer Arm die Schale trägt, während der andere ein Gegengewicht bildet und den Zeiger trägt, der auf einer empirisch bestimmten Skale das Gewicht anzeigt. Zum raschen Wiegen mittlerer Lasten z. B. im Hausgebrauche dient die Familienwage (s. 25.), wie auch häufig kleinere Federwagen als Briefwagen benutzt werden. Zum raschen Wiegen großer Lasten dient die Schnellwage, ein ungleicharmiger eiserner Hebel; an dem kurzen Arme hängt die Last, an dem langen wird ein bekanntes Laufgewicht verschoben. Gleichgewicht findet statt, wenn sich die Entfernung des Laufgewichtes vom Stützpunkte zu derjenigen der Last verhält wie die Last zum Laufgewichte. Hieraus könnte man die Last leicht berechnen; doch steht dieselbe gewöhnlich an den eingekerbten Theilstrichen des Hebels angemerkt. Bequemer und genauer sind die Brückenwagen, von welchen die Decimalwage für größere und die Centesimal- oder Mauthwage für sehr große Lasten benutzt wird. Bei der Decimalwage ruht die Last auf einer Brücke ab (Fig. 51), welche am einen Ende mittels einer Stange an demjenigen Punkte c des Wagbalkens hängt, der dem Stützpunkte 10mal näher ist als die Wagschale, und den wir deswegen Zehntelspunkt nennen wollen. Mit dem anderen Ende ruht die Brücke auf einem einarmigen Hebel df, welcher mittels einer Stange ebenfalls an den Wagbalken gehängt ist, und zwar an einen solchen Punkt g desselben, daß die beiden Stücke gc und mc dieses Wagbalkenarmes sich gerade so zu einander verhalten, wie die beiden Stücke

Fig. 51.

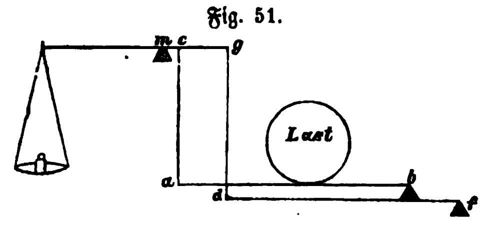
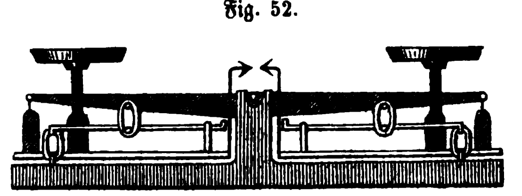


Fig. 52.



des Traghebels der Brücke. Hiernach wird die auf der Brücke ruhende Last von den Punkten a und b getragen; der auf a wirkende Lasttheil wirkt direct auf den Zehntelspunkt c; der auf b wirkende Lasttheil wirkt indirect durch die Hebel df und gm auf diesen Punkt, aber in seiner vollen ungeänderten Größe, weil die Theilung dieser 2 Hebel dieselbe ist, und daher dieser Lasttheil durch den einen ebenso viel vergrößert, als durch den anderen verkleinert wird. Folglich ist die ganze Einrichtung gerade so, als ob die ganze Last an dem Zehntelspunkte c hinge; folglich wird dieselbe durch ein Zehntel ihres Gewichtes balancirt.

Zum raschen und bequemen, aber weniger genauen Abwiegen gewöhnlicher Lasten hat in letzter Zeit die Tafelwage (Fig. 52) viele Verbreitung gefunden. Dieselbe beruht auf dem von Roberval gefundenen statischen Paradoxon, das aber nur ein scheinbares Paradoxon ist, weil die gleichen Lasten zwar scheinbar ungleich weit vom Stützpunkte entfernt sind, in Wirklichkeit aber auf gleich weit entfernte Punkte wirken. Die Construction der Tafelwage (Fig. 52) ist von Beranger in Lyon.

3. Specielle Bewegungen.

a. Die fortschreitende Bewegung.

124 **1. Der Stoß** (Wren 1669). Eine geradlinig fortschreitende Bewegung entsteht durch die Wirkung einer einzigen, sowohl einer momentanen, als auch einer continuirlichen Kraft auf einen freien Körper. Die Einwirkung einer momentanen Kraft nennt man Stoß; die durch denselben erzeugte Bewegung ist gleichförmig. Von besonderem Interesse ist der Fall, den man vorzugsweise im gewöhnlichen Leben mit Stoß bezeichnet, daß ein bewegter Körper mit einem anderen zusammentrifft, den wir uns der größeren Allgemeinheit wegen ebenfalls bewegt denken wollen. Die Stoßwirkung hängt dann ab: 1. von der Masse (m und m') der beiden Körper; 2. von der Geschwindigkeit derselben (c und c'); 3. von der Gestalt der Körper, die wir uns der Einfachheit wegen als Kugel denken; 4. von der Bewegungsrichtung der beiden Körper; 5. von der Stoßrichtung. Die Stoßrichtung ist die Gerade, welche auf dem ebenen Flächenelement senkrecht steht, in welchem sich die Körper berühren, und welche durch den Berührungspunkt geht. Hierdurch unterscheidet man den centralen Stoß und den excentrischen Stoß; bei dem ersteren geht die Stoßrichtung durch die Schwerpunkte der beiden Körper, bei dem letzteren nicht. Der Stoß zweier Kugeln ist demnach stets central. Dann unterscheidet man den geraden Stoß und den schiefen Stoß; bei dem ersteren fällt die Stoßrichtung mit der Bewegungsrichtung zusammen, bei dem letzteren nicht. Endlich hängt die Stoßrichtung noch 6. ab von der Elasticität der Körper. Es gibt zwar weder vollkommen unelastische, noch über jede Grenze hinaus vollkommen elastische Körper; doch läßt sich gerade für diese zwei äußersten, nur gedachten Fälle die Stoßerscheinung leichter untersuchen; die Fälle der Wirklichkeit sind Annäherungen an die für die gedachten Fälle erhaltenen Resultate.

125 **Gesetze des Stoßes unelastischer Körper.** Obwohl die Gesetze des Stoßes sich ebenso wie z. B. die der Wage auf dem Wege logischer Folgerung gewinnen lassen, so wollen wir dieselben doch auf rein mathematischen Wege ableiten, weil diese Methode beim Stoße besonders lehrreich ist. Zunächst mögen zwei unelastische Körper in geradem und centralem Stoße auf einander treffen. Es kann alsdann weder eine drehende, noch eine seitlich ausweichende Bewegung entstehen; vielmehr müssen die beiden Körper in einer Richtung und mit einer und derselben Geschwindigkeit weiter gehen. Denn der schnellere Körper theilt den nächsten Theilchen des anderen Körpers etwas von seiner Bewegung mit, so daß er selbst etwas langsamer gehen muß, der getroffene aber an der Berührungsstelle etwas platt gedrückt wird. Die Bewegung dieser eingedrückten Theilchen pflanzt sich all-

mälig auf die entfernteren Theilchen des gestoßenen Körpers und dadurch auf den Körper fort. Dies setzt sich so lange fort, bis beide Körper gleiche Geschwindigkeiten haben, weil dann der Grund für die Mittheilung der Bewegung wegfällt. Man könnte nun auf den Gedanken kommen, die Theorie des Stoßes darauf zu gründen, daß die lebendige Kraft vor dem Stoße nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft gleich der lebendigen Kraft nach dem Stoße sein müsse; das Princip findet auch hier jedenfalls statt; nur ist bei dem Stoße von nicht vollkommen elastischen Körpern zu beachten, daß bei dem Plattdrücken eine Lagenänderung der Moleküle stattfindet, also ein Theil der lebendigen Kraft in Spannkraft umgesetzt wird, und daß diese Formänderung nicht ohne eine Verstärkung der molekularen Schwingungen, ohne eine Temperaturerhöhung, geschehen kann, daß also jedenfalls ein Theil der lebendigen Kraft nicht am Stoße betheiligt ist. Hiernach kann die lebendige Kraft nicht für die Erforschung des Stoßes benutzt werden, wohl aber der von derselben ausgeübte Druck; denn während des Stoßes ist nach dem fünften Axiom der zwischen beiden Körpern stattfindende Druck nach beiden Seiten gleich groß; folglich hängt die Geschwindigkeitsänderung derselben nur von der Masse der Körper ab; die größere Masse muß die kleinere Aenderung und die kleinere Masse die größere Aenderung erfahren, weil bei gleichen Kräften (nach 19.) die erzeugten Geschwindigkeiten sich umgekehrt wie die Massen verhalten. Ist nun die unbekannte gemeinsame Geschwindigkeit nach dem Stoße $= x$, so ist der Verlust der schnelleren Kugel $c - x$ und der Gewinn der langsameren $x - c'$; daher entsteht die Proportion $m : m' = (x - c') : (c - x)$, woraus sich ergibt

$$x = \frac{mc + m'c'}{m + m'} \qquad (18)$$

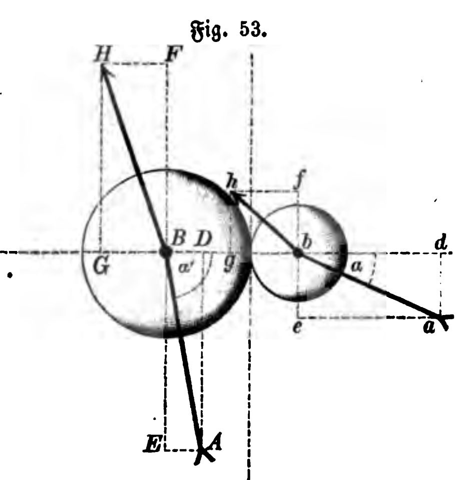
Discussion dieser Formel. 1. Ist der gestoßene Körper in Ruhe, also $c' = 0$, so fällt das Glied $m'c'$ weg; wenn nun gegen eine feste Wand gestoßen wird, so ist m' gegen m unendlich, also $x = mc : \infty = 0$. **Stößt ein unelastischer Körper gegen eine feste Wand, so ruht er nach dem Stoße.**

2. Ist die gestoßene ruhende Kugel $m' = m$, so ist $x = \frac{1}{2}c$. **Stößt eine unelastische Kugel gegen eine ruhende von gleicher Größe, so gehen beide mit der halben Geschwindigkeit der stoßenden weiter.**

3. Für $m = m'$ ist $x = \frac{1}{2}(c + c')$. **Stoßen zwei gleiche unelastische Kugeln nach einer Richtung zusammen, so erhalten sie die halbe Summe der Geschwindigkeiten.**

4. Bei entgegengesetzter Richtung muß c' negativ gesetzt werden, wenn c positiv ist; dann ist $x = \frac{1}{2}(c - c')$. **Stoßen zwei gleiche unelastische Kugeln in entgegengesetzter Richtung auf einander, so erhalten sie die halbe Differenz der Geschwindigkeiten.**

Fig. 53.



5. Stoßen zwei unelastische Kugeln in schiefem Stoße zusammen, so kommen nur diejenigen Componenten der Geschwindigkeit zur Stoßwirkung, welche in die Stoßrichtung, hier in die Richtung der Centrallinie Bb (Fig. 53) fallen, während die tangentialen Componenten theils Reibung der platt gedrückten Stellen und hierdurch Rotation bewirken, theils die Kugeln in der tangentialen Richtung weiter treiben. Sind die Winkel, welche die 2 Bewegungsrichtungen mit der Stoßrichtung einschließen, mit α und α' bezeichnet, so sind die tangentialen Componenten $be = c \sin \alpha$ und $BE = c' \sin \alpha'$, während die centralen

Componenten $bd = c \cos \alpha$ und $BD = c' \cos \alpha'$ sind; vermöge der letzteren entsteht nach Fl. 15 die gemeinsame Stoßgeschwindigkeit

$$x = \frac{mc \cos \alpha + m'c' \cos \alpha'}{m + m'}$$

Mit dieser componirt sich nach dem Stoße in der Kugel m die tangentiale Geschwindigkeit $bf = c \sin \alpha$ zu der Geschwindigkeit bh, ebenso wie in der Kugel m' durch Vereinigung der gemeinsamen centralen Geschw. x mit der tangentialen BF die Geschw. BH entsteht, welche leicht nach dem Parallelogramm der Kräfte zu berechnen sind.

Aufg. 153. Wie erklärt sich der scheinbare Widerspruch in dem ersten Satze mit dem Gesetze von der Erhaltung der Kraft? — A. 154. Wie groß ist der Verlust an lebendiger Kraft, der bei dem Stoße unelastischer Körper durch die bleibende Zusammendrückung derselben und die Fortpflanzung der Erschütterungen in die Erde stattfindet. Antw.: Vor dem Stoße ist die lebendige Kraft $= \frac{1}{2} mc^2 + \frac{1}{2} m'c'^2$, nach dem Stoße $= \frac{1}{2} (m + m') x^2$; daher der Verlust $= \frac{1}{2} mc^2 + \frac{1}{2} m'c'^2 - \frac{1}{2} (m + m') x^2$. Durch Substitution des Werthes für x wird derselbe $= mm' (c - c')^2 : 2 (m + m')$. — A. 155. Zwei Körper von 100g und 200g stoßen mit 50 und 20cm Geschw. auf einander; welches ist ihre gemeinsame Geschw. nach dem Stoße? Antw.: $x = 30^{cm}$.

126 **Gesetze des Stoßes elastischer Körper.** Auch hier betrachten wir zuerst den geraden, centralen Stoß. Der treffende Körper verliert, weil er den nächsten Theil des getroffenen Körpers eindrückt, von seiner Geschwindigkeit den Betrag $c - x$; da aber diese eingedrückten Theilchen mit derselben Kraft zurückkehren, wenn der Körper vollkommen elastisch ist, so üben sie denselben Rückstoß aus, der auf sie ausgeübt wurde, so daß der treffende Körper dieselbe Geschwindigkeit noch einmal verliert; folglich ist seine Geschwindigkeit nach dem Stoße $v = c - 2 (c - x) = 2x - c$. Ganz ebenso ergibt sich für den getroffenen Körper $v' = c' + 2 (x - c') = 2x - c'$. Setzen wir den Werth für x aus Formel (18) hier ein, so erhalten wir

$$v = \frac{(m - m')\, c + 2m'c'}{m + m'} \quad \text{und} \quad v' = \frac{(m' - m)\, c' + 2mc}{m + m'}$$

Discussion dieser Formeln. 1. Ist der gestoßene Körper in Ruhe, also $c' = 0$, und ist $m' = \infty$, so ergibt sich $v' = 0$ und $v = -c$. Stößt eine elastische Kugel in geradem Stoße gegen eine elastische Wand, so kehrt sie mit derselben Geschwindigkeit in entgegengesetzter Richtung zurück.

2. Ist die gestoßene Kugel $m' = m$ und in Ruhe, so ergibt sich $v = 0$ und $v' = c$. Stößt eine elastische Kugel in geradem Stoße gegen eine gleiche ruhende, so ruht die stoßende, und die gestoßene geht mit der Geschwindigkeit der stoßenden weiter.

3. Für $m = m'$ und einen positiven Werth beider Geschwindigkeiten ergibt sich $v = c'$ und $v' = c$. Ebenso ergibt sich, wenn c negativ ist, $v = -c'$ und $v' = c$. Stoßen also zwei gleiche elastische Kugeln in geradem Stoße in derselben oder in entgegengesetzter Richtung auf einander, so gehen sie mit vertauschten Geschwindigkeiten weiter.

4. Stößt eine elastische Kugel gegen eine Reihe von elastischen Kugeln, so ruhen alle, nur die letzte geht mit der Geschwindigkeit der stoßenden weiter. Dies folgt einfach aus Nro. 2. Ebenso gehen die 2, 3 u. s. w. letzten Kugeln weiter, wenn 2, 3 u. s. w. Kugeln gegen das erste Ende stoßen.

5. Stößt eine elastische Kugel gegen eine elastische Wand in schiefem Stoße, so geht sie nach der entgegengesetzten Seite unter demselben Winkel mit derselben Geschwindigkeit zurück.

Beweis. Die Geschwindigkeit ab (Fig. 54) kann man nach dem Parallelogramm der Kräfte in zwei Geschwindigkeiten zerlegen, cb in der Richtung der Wand und db senkrecht zu derselben. Vermöge der letzteren würde die Kugel in derselben Zeit den Weg bd (nach Nro. 1) zurück durchlaufen, in welcher sie vermöge der ersteren den Weg $bf = cb$ machen würde. Da die wirkliche Bewegung der Kugel sich aus diesen beiden Bewegungen zusammensetzt, so muß die Kugel den Weg bg einschlagen, für welchen $bg = ba$ und $\measuredangle fbg = \measuredangle cba$ ist.

6. Bei dem schiefen Stoße zweier elastischen Kugeln gilt für die centrale Componente die Formel für die gemeinsame Stoßgeschwindigkeit x in 5. des ersten Falles, jedoch nur für das erste Zusammentreffen; durch die Rückkehr der plattgedrückten Stellen wird aber nach dem Eingange dieses Abschnittes die centrale Geschwindigkeit der ersten Kugel $2x - c \cos \alpha$, welche sich mit der tangentialen Geschw. $c \sin \alpha$ zu der Geschw. nach dem

Stoße componirt. Ebenso entsteht die Geschw. der zweiten Kugel als Resultante der centralen Geschw. $2x - c' \cos \alpha'$ und der tangentialen $c' \sin \alpha'$.

Für den speciellen Fall, Fig. 55, daß beide Kugeln gleich sind und die Geschw. c' der gestoßenen gleich Null, also auch $\alpha' = 0$ ist, ergibt sich $x = \frac{1}{2} c \cos \alpha$; daher ist nach dem Stoße die centrale Geschw. der stoßenden $= 2 \cdot \frac{1}{2} c \cos \alpha - c \cos \alpha = 0$, und die tangentiale $= c \sin \alpha$, während die centrale Geschw. der zweiten Kugel $= 2 \cdot \frac{1}{2} c \cos \alpha - 0 = c \cos \alpha$ und die tangentiale Geschw. derselben $= 0$ ist. Es bleibt also für die stoßende Kugel keine centrale, dagegen die tangentiale Geschw. $c \sin \alpha$ übrig, während die gestoßene keine tangentiale, dagegen eine centrale Geschw. $c \cos \alpha$ besitzt. Die Zerlegung der Geschwindigkeiten ist demzufolge einfach durch Fig. 55 dargestellt. Wenn von zwei gleichen Kugeln die eine in Ruhe ist und von der anderen in schiefem Stoße getroffen wird, so geht die erstere in der Richtung der Centrallinie, die letztere in der dazu senkrechten Richtung weiter. Die Richtung der ersteren ist im Billardspiel beim Schneiden, die der letzteren beim Caramboliren ins Auge zu fassen.

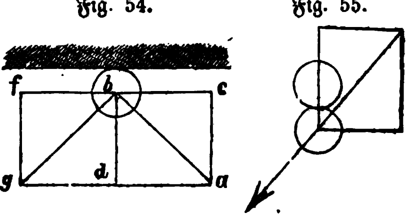


Fig. 54. Fig. 55.

Auch das Gesetz 5. geht als einfache Folgerung aus 6. hervor, und hat ebenfalls im Billardspiel seine Verwendung.

7. Durch die verschiedene tangentiale Geschw. tritt beim schiefen Stoße Reibung auf, welche die Kugeln in Rotation versetzt; dieselbe Bewegung entsteht auch, wenn man eine Billardkugel mit dem Queue in schiefem Stoße, also oben oder unten, links oder rechts von dem nächsten Punkte trifft. In diesem Falle wirkt die Reibung der Kugel auf der Unterlage wesentlich ändernd ein; sie bringt nämlich durch die Rotation der Kugel eine zweite fortschreitende neben der durch den Stoß erzeugten hervor. Wird die Kugel oben getroffen, so sind die zwei fortschreitenden Bewegungen von gleicher Richtung, daher läuft die Kugel lange fort, selbst noch, wenn sie eine zweite getroffen hat. Wird aber die Kugel unten getroffen, so ist die zweite fortschreitende Bewegung von entgegengesetzter Richtung zu der ersten, so daß eine solche Kugel stehen bleiben oder gar zurückrollen kann, wenn ihre fortschreitende Bewegung durch Reibung oder einen Rückstoß aufgehoben wird. (Klappstöße.) Ebenso kann eine Kugel von einer anderen unter den verschiedensten Winkeln abprallen, je nachdem ihre rotirende Bewegung durch Treffen auf der einen oder anderen Seite eine verschiedene Richtung und Stärke hat. (Caramboliren.) Ueberhaupt bietet das Billardspiel die mannigfaltigsten und überraschendsten Stoßprobleme und eignet sich gut zur Einsicht in die 3 letzten Gesetze; die 4 ersten zeigt man experimentell mit der Percussionsmaschine von Mariotte und Nollet.

Aufg. 186. Wie groß ist der Verlust an lebendiger Kraft bei dem Stoße elastischer Körper? Antw.: $\frac{1}{2}(mc^2 + m'c'^2 - mv^2 - m'v'^2)$. Substituirt man hierin die Werthe von v und v', so ergibt sich der Verlust $= 0$. Dieses ist nur dadurch möglich, daß die Erschütterungen der Theilchen ganz zu den Rückstößen verwendet werden, sich also nicht auf benachbarte Körper fortpflanzen; es geht daher auch von der Stoßkraft nichts verloren. Man macht hiervon Anwendung, um die schädliche Wirkung von Stößen zu vermindern. Die Wägen hängt man in Federn, um die Stöße zu mildern, und um dadurch sowohl den Bau leichter machen, als auch länger erhalten zu können, sowie um an Zugkraft zu sparen. Die Ambose großer Hämmer erhalten ein elastisches Fundament aus eichenen Balken. Der Stoß hat auch viele nützliche Anwendungen: das Eintreiben von Nägeln, das Einrammen der Pfähle, das Sprengen von Steinen durch Eisenkeile und durch Pulver; das Bearbeiten von Holz, Steinen, Eisen und anderer Metalle durch Meißel, Feile, Hämmer u. s. w. beruht auf der Wirkung des Stoßes. — A. 187. Wie groß ist die Geschwindigkeit der 2 Körper in A. 185, wenn sie elastisch sind? Aufl.: $v = 10^{cm}$ und $v' = 40^{cm}$.

127 **2. Der freie Fall.** Unter dem freien Falle versteht man die fortschreitende Bewegung eines nicht unterstützten Körpers gegen den Mittelpunkt der Erde hin, hervorgebracht durch die Anziehung der Erde. Um die Gesetze dieser Wirkung in aller Reinheit zu erkennen, müssen wir von Nebenumständen absehen, wie z. B. von dem Widerstande der Luft; ebenso abstrahiren wir von der allmäligen Zunahme der Schwerkraft eines Körpers, wenn derselbe dem Mittelpunkte der Erde durch den Fall näher kommt; denn diese Zunahme ist für die auf der Oberfläche der Erde stattfindenden Fallerscheinungen unmeßbar klein und daher auf die Gesetze derselben ohne Einfluß. — Der freie Fall ist eine gleichförmig beschleunigte

Bewegung: denn die Erde übt nach unserer Voraussetzung in jedem unendlich klein gedachten Zeittheilchen stets denselben Einfluß auf den Körper aus, sie muß daher dem Körper in jedem Zeittheilchen dieselbe Geschwindigkeit ertheilen; diese muß er dann nach dem Gesetze der Trägheit beibehalten, um in dem folgenden Zeittheilchen dieselbe Geschwindigkeit ebenfalls zu erhalten und die Geschwindigkeit daher ganz gleichmäßig zu vergrößern. In solcher Weise erhält ein frei fallender Körper in jeder Secunde eine Geschwindigkeit von $9,808^m$ oder ca. 10^m. Diese ganz allgemein mit g bezeichnete Geschwindigkeit nennt man die Beschleunigung oder Acceleration der Schwere, weil ein fallender Körper sie durch die Schwerkraft in jeder Secunde erhält und dadurch seine Geschwindigkeit in jeder Secunde um g vergrößert. Am genauesten wird diese Größe durch Pendelversuche gefunden. Es wurde schon früher erwähnt, daß sie das Maß der Anziehung der Erde oder der Schwerkraft ist.

Auch wurde schon angeführt, daß die Ausdrücke „Anziehung der Erde, Schwerkraft" nur ein Nothbehelf für unsere mangelhafte Einsicht in die Sachlage sind. Mayer erklärt, ein Körper fällt, weil er durch sein Erheben Arbeit consumirt hat und dieselbe in Form von Spannkraft enthält, die ihn wieder zur Erde treibt. Jedoch ist diese Erklärung nicht ausreichend, weil sie das Gewicht eines am Boden liegenden Körpers und dessen Sinken, wenn der Boden weich wird, unaufgehellt läßt, und weil die Wirksamkeit jener Spannkraft unverständlich bleibt. Eher könnte dieselbe verständlich werden, wenn sich zeigen ließe, daß außerhalb der Erde ein nach der Erde hintreibender Druck vorhanden wäre, der aus dem Stoße kleiner Theilchen bestehen könnte, die dann eine ähnliche Wirkung ausüben würden, wie etwa ein constanter einseitiger Gasdruck auf eine Kugel, die sich ohne Reibung in einer horizontalen Röhre fortbewegen kann. Ein solcher Gasdruck müßte eine gleichförmig beschleunigte Bewegung hervorbringen, da er in jeder Secunde dieselbe Geschwindigkeit, also eine constante Acceleration a, bewirken müßte. Wenn man den Gasdruck gleich dem Gewichte des Körpers wählen könnte, so unterschiede sich die Bewegung in nichts vom freien Falle, weil dann $a = g$ wäre; wenn aber jener constante Druck kleiner als das Gewicht gewählt würde, so könnte die Bewegung mehr dem Fallen eines Körpers auf dem Monde verglichen werden, da dann $a < g$ bliebe; und für den Fall, daß der constante Gasdruck das Gewicht überträfe, würde $a > g$ sein, und die Bewegung wäre dann dem Fallen eines Körpers auf der Sonne zu vergleichen. Zu erklären bliebe dann noch, warum jener constante Druck auf verschiedenen Weltkörpern eine verschiedene Acceleration hervorbrächte.

Fallgesetze. (Galilei 1602). Die Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung, die wir schon in 16. abgeleitet haben, sind auch die Gesetze des freien Falles. Da indessen der freie Fall eine wichtige Erscheinung ist, so werden sie für denselben speciell ausgesprochen, abgeleitet und nachgewiesen.

1. Die Geschwindigkeiten eines frei fallenden Körpers verhalten sich wie die Fallzeiten oder $v = gt$ . . . . (2)

Die Erde ertheilt einem fallenden Körper in der ersten Sec. die Geschw. g; diese muß er nach dem Gesetze der Trägheit in der 2. Sec. beibehalten; in dieser erhält er aber gleichfalls die Geschw. g; folglich hat er am Ende der 2ten Sec. die Geschw. 2g. Diese muß er nach dem Gesetze der Trägheit in der 3ten Sec. beibehalten; in dieser erhält er aber gleichfalls die Geschw. g; folglich hat er am Ende der 3ten Sec. die Geschw. 3g u. s. w., am Ende der 4ten Sec. die Geschw. 4g u. s. w., am Ende der t ten Sec. die Geschw. tg, also $v = gt$. Nach dieser Formel berechnet man die Geschw. eines frei fallenden Körpers in Metern, indem man die Secundenzahl mit 10 oder genauer mit 9,808 multiplicirt.

2. Der Weg in der ersten Secunde ist halb so groß als die Endgeschwindigkeit der ersten Secunde, also $= \frac{1}{2} g = 5^m$.

Am Anfange der 1. Secunde hat der Körper die Geschw. 0, am Ende derselben die Geschw. g, also ist die Mittelgeschwindigkeit $= \frac{1}{2}(0 + g) = \frac{1}{2} g$. Es wird nach 15.5 in Wirklichkeit derselbe Weg zurückgelegt, der bei gleichförmiger Bewegung in 1 Sec. mit der constanten Mittelgeschwindigkeit $\frac{1}{2} g$ zurückgelegt würde, also ist der Weg $= \frac{1}{2} g$.

3. Die Wege in den auf einander folgenden Secunden verhalten sich wie die ungraden Zahlen; sie sind in der 1sten Secunde

$= 1 . g/2 = 1 . 5^m$, in der 2ten $= 3 . g/2 = 3 . 5^m$, in der 3ten $= 5 . g/2 = 5 . 5^m$, in der 4ten $= 7 . g/2 = 7 . 5^m$ u. s. w.

Die Geschw. am Anfange der 2. Sec. = g, am Ende derselben = 2g; folglich ist die Mittelgeschw. $= \frac{1}{2}(g + 2g) = 3 . g/2$; daher ist der Weg in der zweiten Secunde $= 3 . g/2$ u. s. w.

4. **Die Fallräume in den ganzen Fallzeiten verhalten sich wie die Quadrate der Fallzeiten**, sie sind $1 . g/2 = 1 . 5^m$, $4 . g/2 = 4 . 5^m$, $9 . g/2 = 9 . 5^m$, $16 . g/2 = 16 . 5^m$ u. s. w., überhaupt $s = t^2 . g/2 = \frac{1}{2} gt^2$ ..(3)

Durch Addition der Einzelwege aus 3. ergibt sich für 2 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 = 4 . g/2$; für 3 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 + 5 . g/2 = 9 . g/2 = 9 . 5^m$; für 4 Sec. $s = 1 . g/2 + 3 . g/2 + 5 . g/2 + 7 . g/2 = 16 . g/2 = 16 . 5^m$ u. s. w. Allgemein: Die Geschw. am Anfange der 1 Sec. ist = 0, am Ende der tten Sec. = gt; daher ist die Mittelgeschw. $= \frac{1}{2}(o + gt) = \frac{1}{2} gt$; folglich ist der Weg in t Sec. $s = \frac{1}{2} gt . t = \frac{1}{2} gt^2$. Nach dieser, der Hauptformel des freien Falles, berechnet man insbesondere den Raum in Metern, den jeder frei fallende Körper in beliebiger Zeit zurücklegt, indem man die Zahl der Secunden ins Quadrat erhebt und dieses Quadrat mit 5 multiplicirt.

5. **Die Fallräume verhalten sich wie die Quadrate der Endgeschwindigkeiten** oder $s = v^2 : 2g$ . . . . (4)

Das Gesetz ist eine Verbindung der Gesetze 4 und 1; wenn sich nach 4 die Fallräume wie die Quadrate der Fallzeiten, und wenn nach 1 diese sich wie die Geschwindigkeiten verhalten, so müssen die Fallräume auch den Quadraten der Endgeschwindigkeiten proportional sein. Auch die Formel (4) ist eine Verbindung von (2) und (3); denn aus der ersten ergibt sich $t = v : g$, und durch Substitution dieses Werthes in die zweite findet man $s = v^2 : 2g$. Mittels dieser Formel findet man die Höhe s, welche ein Körper durchfallen muß, um die Geschw. v zu erreichen; daher wird der Ausdruck $v^2 : 2g$ auch **Geschwindigkeitshöhe** genannt.

6. **Die Fallzeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen** oder $t = \sqrt{(2s : g)}$ . . . . (19)

Dieser Satz ist eine Umkehrung von 5; auch folgt die Fl. (19) aus (3), wenn man aus derselben t sucht.

7. **Die Geschwindigkeiten verhalten sich wie die Quadratwurzeln aus den Fallräumen** oder $v = \sqrt{(2gs)}$ . . . . (4)

Das Gesetz ist eine Verbindung von 6 und 1, und die wichtige Formel ist nur eine Umkehrung von (4), deßhalb mit derselben Nummer bezeichnet. Nach dieser Formel berechnet sich leicht die Geschw., die ein fallender Körper am Fuße der durchfallenen Höhe s besitzt; sie findet besondere Anwendung in den Lehren vom Pendel und von der Bewegung der Flüssigkeiten.

Nachweise für diese Gesetze sind mehrfach an hohen Thürmen oder tiefen Schachten geführt worden z. B. von Benzenberg (1802) am Michaelisthurme in Hamburg und von Reich (1832) in einem Bergschachte bei Freiberg. Indessen sind derartige Nachweise doch sehr beschränkt, da ein frei fallender Körper schon in 5 Sec. eine Höhe von 125^m, wie sie sich selten an Thürmen findet, durchläuft. Um experimentelle, überall mögliche Nachweise zu führen, handelt es sich darum, die Bewegung in einer solchen Weise zu verlangsamen, daß die Gesetze unverändert bleiben. Dies kann nach 2 Methoden geschehen: 1. Durch Verringerung der Kraft bei unveränderter Masse; 2. durch Vergrößerung der Masse bei gleichbleibender Kraft; bei beiden Methoden wird die Geschwindigkeit kleiner, bei ersterer, weil nach 19. und 23. bei gleichen Massen die Geschwindigkeiten sich wie die Kräfte verhalten, und bei der zweiten, weil bei gleichen Kräften sich die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Massen verhalten. Der erste Gedanke wurde schon von Galilei verwirklicht, der die Fallgesetze auffand, indem er Kugeln auf schiefen Ebenen herabrollen ließ. Die Kraft, mit welcher ein Körper vom Gewichte p auf einer schiefen Ebene herabrollt, ist bekanntlich (nach 103.) nicht p, sondern $p \sin \alpha$; folglich ist nach dem angegebenen Satze die Acceleration nicht g, sondern $g \sin \alpha$, kann also durch Verkleinerung von α auf jeden beliebigen Grad der Kleinheit gebracht werden. In den Formeln des freien Falles ändert sich für die schiefe Ebene nichts als g; hierdurch werden die Verhältnisse einzelner Werthe nicht geändert, die Gesetze also aufrecht erhalten. Der zweite Gedanke ist in Atwoods Fallmaschine (1781) verwirklicht (Fig. 2. S. 34.), in welcher ein kleines fallendes Gewicht, etwa von 1^g, noch einen Ballast, z. B. die Masse von 200^g, im Ganzen also die Masse von 201^g zu bewegen hat, wodurch die Acceleration nicht $= 10^m$, sondern $= 10^m : 201 = 5^{cm}$ wird. Der Weg in der ersten Sec. beträgt dann nur $2{,}5^{cm}$ oder 1″ hessisch.

Hat man demnach eine Seitenfläche des Gestelles in hessische Zolle eingetheilt und an demselben eine verschiebbare Grundplatte K angebracht, die man nach und nach in Entfernungen von 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81″ von dem hinaufgezogenen größeren Gewichte befestigt, und läßt man dieses mit einem Secundenschlage los, so schlägt es in 1, 2, 3 .... 9 Sec. auf die Grundplatte K auf, womit das Hauptgesetz No. 4 und damit auch alle übrigen Gesetze, sowie die Größe der Acceleration = 10m nachgewiesen sind. Von besonderem Interesse ist es indeß, das Gesetz 1. speciell nachzuweisen; zu dem Ende erhält das Uebergewicht die Form eines größeren Ringes oder eines längeren Stäbchens, wie es (Fig. 2) in der Nebenfigur bei H sichtbar ist. Außerdem wird in Entfernungen von 1, 4, 9″ . . . eine durchbrochene Platte angeschraubt, welche das Uebergewicht nach 1, 2, 3 . . . Sec. abnimmt, so daß nach diesen Zeiten die Gewichte sich nur durch ihre lebendige Kraft weiter bewegen; man findet dann, daß die Gewichte nach diesen Zeiten in jeder Sec. bezüglich 5, 10, 15cm .... zurücklegen, womit das erste Gesetz und abermals die Acceleration = 10m nachgewiesen ist. Bei vollkommeneren Apparaten ist ein Secunden schlagendes Pendel so angebracht, daß mit der Auslösung des größeren Gewichtes die Pendelschwingungen und die Bewegungen des Secundenzeigers beginnen.

128 **Fall auf der schiefen Ebene.** Da die Acceleration bei der schiefen Ebene $= g \sin \alpha$ ist, so sind die Formeln für diese Fallbewegung

$$v = gt \sin \alpha, \quad s = \tfrac{1}{2} gt^2 \sin \alpha, \quad s = v^2 : 2g \sin \alpha, \quad v = \sqrt{2g \sin \alpha}. \quad (20)$$

Außer den Gesetzen des freien Falles bestehen für die Fallbewegung auf der schiefen Ebene im Verhältnisse zum freien Falle einige interessante Beziehungen, die sich aus diesen Formeln ergeben:

Da nämlich (Fig. 56) $s \sin \alpha = h$, so läßt sich die letzte Formel (20) auch in der Gestalt $v = \sqrt{(2gh)}$ schreiben; dieser Ausdruck $\sqrt{(2gh)}$ gibt aber nach (4) die Geschw. an, die ein Körper erreicht, wenn er die Höhe h frei durchfällt; folglich ist die Endgeschwindigkeit in beiden Fällen gleich groß. Die Endgeschwindigkeit eines fallenden Körpers ist dieselbe, wenn er eine und dieselbe Höhe frei oder auf

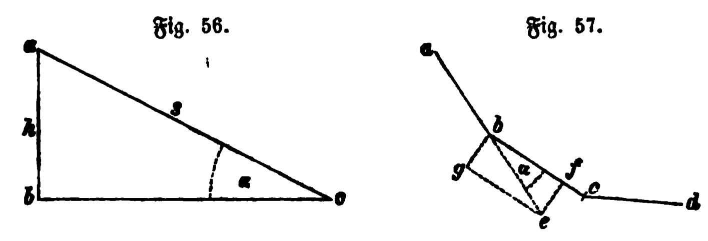


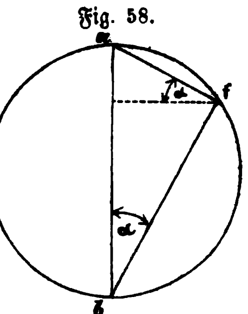
Fig. 56. Fig. 57.

einer beliebig geneigten Ebene durchfallen hat. Geht der Körper jedoch von einer schiefen Ebene auf eine andere über, so erleidet er an jedem Uebergange einen Verlust an Geschwindigkeit. Denn ist (Fig. 57) seine Geschw. v in der Richtung abe im Punkte b = be, so legt er nach dem Parallelogramm der Kräfte in der folgenden Secunde wirklich nur den Weg $bf = be \cos \alpha = v \cos \alpha$ zurück, verliert also an Geschw. den Betrag $v - v \cos \alpha = v(1 - \cos a) = 2v \sin^2 \alpha/2$. Dieser Verlust ist = Null, wenn $\alpha = 0$, wenn also die gebrochene Linie abcd in eine gerade übergeht; er ist verschwindend klein, wenn α verschwindend klein ist, d. h. wenn sich der Körper auf einer concaven krummen Linie bewegt, da in einer solchen die Richtungsänderung an jeder Stelle verschwindend klein ist; demnach ist die Geschwindigkeit auch am Fuße einer concaven krummen Fläche dieselbe wie am Fuße einer schiefen Ebene von gleicher Höhe und wie am Fuße der senkrechten Höhe selbst.

Ist die Anfangsgeschwindigkeit am Gipfel der schiefen Ebene = 0 und die Endgeschwindigkeit am Fuße von s oder h (Fig. 56) = v, so ist die Mittelgeschw. in beiden Fällen = ½ v. Da bei gleichen Geschwindigkeiten sich die Zeiten zweier Bewegungen wie die durchlaufenen Wege verhalten, so ergibt sich der Satz: die zum freien Durchfallen der Höhe und die zum Durchlaufen der Länge einer schiefen Ebene erforderlichen Zeiten verhalten sich wie die Höhe zur Länge. Der Körper kommt also am Fuße von s zwar mit derselben Geschw., aber viel später an als am Fuße von h. Hierdurch wird die Frage nahe gelegt, ob es kein Mittel gäbe, den Weg von a bis c in kürzerer Zeit zurückzulegen, als es auf der geraden Bahn ac geschieht. Solche Mittel sind verschiedene concave Bahnen; so wird schon ein Kreisbogen zwischen a und c in kürzerer Zeit durchfallen als die Gerade; in kürzester Zeit gelangt jedoch ein Körper

von a nach c, wenn zwischen beiden Stellen eine Bahn von der Form der Radlinie oder Cycloide angebracht ist, einer Linie, welche ein Punkt eines auf ebener Bahn fortrollenden Rades im Raume beschreibt. Die Cycloide ist demnach die Linie der kürzesten Fallzeit, Brachystochrone; sie ist aber auch die Linie gleicher Fallzeit, Tautochrone, weil die Fallzeit dieselbe bleibt, ob der Körper seine Bewegung am höchsten Punkte oder an irgend einem anderen Punkte der Cycloide beginnt. Die Beweise für diese Sätze sind hier nicht möglich. — Eine interessante Eigenschaft hinsichtlich der Fallzeit haben die Sehnen eines Kreises; es werden nämlich die von dem höchsten und vom tiefsten Punkte ausgehenden Sehnen eines Kreises in derselben Zeit durchfallen wie der senkrechte Durchmesser. Fällt ein Körper (Fig. 58) den Durchmesser $ab = d$ herab, so ist $d = \frac{1}{2}gt^2$, woraus $t = \sqrt{(2d:g)}$; fällt er durch die Sehne af, so ist $af = \frac{1}{2}gt^2 \sin\alpha$, also $t = \sqrt{(2af:g\sin\alpha)}$; da nun $af : \sin\alpha = ab = d$, so ist auch hier $t = \sqrt{(2d:g)}$; fällt endlich der Körper durch fb, so ist $fb = \frac{1}{2}gt^2 \cos\alpha$, woraus $t = \sqrt{(2fb : g\cos\alpha)}$; da nun $fb : \cos\alpha = ab = d$, so ist auch hier $t = \sqrt{(2d:g)}$; die Fallzeit ist in allen Fällen dieselbe.

Fig. 58.



Aus dem Satze, daß die Geschwindigkeiten am Fuße der Länge und der Höhe der schiefen Ebene dieselben sind, und daß die Fallzeiten sich wie die Länge zur Höhe verhalten, darf man nicht etwa schließen, daß in gleichen Zeiten gleiche Wege auf der Länge und der Höhe zurückgelegt würden, vielmehr verhalten sich die auf der Länge und längs der Höhe durchfallenen Wege in gleichen Zeiten umgekehrt wie die Länge zur Höhe. Dies ergibt sich aus der zweiten Formel (20), wonach der Fallraum auf der schiefen Ebene $s = \frac{1}{2}gt^2 \sin\alpha$, während der freie Fallraum in derselben Zeit ist $s' = \frac{1}{2}gt^2$; durch Division entsteht $s : s' = \sin\alpha = h : l$. Der Weg auf der schiefen Ebene ist also kleiner als der freie Fallraum in derselben Zeit und zwar in dem Maße, in welchem die Höhe kleiner ist als die Länge.

129 Aufg. 188. Auf der Ebernburg ist ein Brunnen, in den ein Stein (von 1 kg) erst in $4\frac{1}{2}$ Sec. hinabfällt; wie tief ist derselbe, welche Geschwindigkeit hat der Stein beim Aufschlagen, und welches ist dann seine lebendige Kraft? Aufl.: Tiefe $\frac{1}{2}.\ 10.\ (4\frac{1}{2})^2 = 101\frac{1}{4}$ m; Geschwindigkeit $= 10 . 4\frac{1}{2} = 45$ m; leb. Kraft $= \frac{1}{2}mc^2 = \frac{1}{2} . \frac{1}{10} . 45^2 = 101\frac{1}{4}$ mk. — A. 189. Welche Zeit würde ein Stein brauchen, um von der Spitze des Straßburger Münsters 125m hoch herunterzufallen, und mit welcher Geschwindigkeit würde er anlangen? Aufl.: $t = 5$ Sec. und $c = 50$m. — A. 190. Von welcher Höhe muß ein Stein herabfallen, um eine Geschwindigkeit von 100m zu erlangen? Aufl.: $s = c^2 : 2g = 500$m — A. 191. Eine Kugel rollt auf einem Abhange von 30° Neigung 120m weit hinab; mit welcher Geschwindigkeit und nach welcher Zeit langt sie am Fuße an? $c = \sqrt{(2gs \sin\alpha)} = 34{,}6$m; $t = \sqrt{(2s : g \sin\alpha)} = 7$ Sec. — A. 192. Ein Eisenbahnzug von 100 Tonnen läuft auf einer Rampe von $\frac{1}{30}$ Steigung herab; welche Geschwindigkeit und welche lebendige Kraft hat er er nach 3 Minuten? $c = gt \sin\alpha = 60$m; leb. Kraft 18 Mill. mk. — A. 193. Wie groß muß der Neigungswinkel einer schiefen Ebene sein, damit ein Körper eine Beschleunigung von 5m erhalte? Aufl.: $5 = 10 \sin\alpha$; hieraus $\alpha = 30°$.

130 **3. Die Wurfbewegung.** Auch mehrere Kräfte können eine fortschreitende und sogar eine geradlinig fortschreitende Bewegung erzeugen, z. B. wenn auf einen Körper mehrere momentane Kräfte wirken, oder wenn momentane und continuirliche Kräfte auf einen Körper in derselben geraden Linie ihre Wirkung ausüben. Wirkt eine continuirliche Kraft aber nach einer anderen Richtung auf einen Körper als eine momentane, so wird die erste Kraft den Körper fortwährend von der geraden Linie ablenken, die er vermöge der letzten Kraft einschlagen muß; er wird also eine krummlinig fortschreitende Bewegung annehmen müssen, die unter Umständen zu einer drehenden werden kann. Die Wurfbewegung ist ein Beispiel für die letzterwähnten Fälle; denn eine solche entsteht, wenn ein freier Körper über der Erdoberfläche einen Stoß erhält und dann der Wirkung der Schwere überlassen wird.

Die Wurfbewegung ist geradlinig, wenn ein Körper senkrecht abwärts oder senkrecht aufwärts geworfen wird. Die Geschwindigkeit und der Wurfraum sind dann einfach gleich der Summe oder Differenz der durch den Stoß und durch den

Fall erzeugten Größen; die Geschwindigkeit ist $v = c \pm gt$ und der Wurfraum $s = ct \pm {}^1/_2 gt^2$. Von besonderem Interesse ist der Wurf senkrecht aufwärts; es entsteht dann die Frage nach der Höhe des Wurfes. Der Körper steigt so hoch, als er hätte fallen müssen, um die Wurfgeschwindigkeit zu erlangen. Denn diese gleichförmig verzögerte Wurfbewegung senkrecht aufwärts ist zu Ende, wenn die Geschwindigkeit $v = 0$ ist, wenn also $c - gt = 0$, d. h. wenn $t = c : g$ ist. Setzen wir diesen Werth der Steigzeit in den Wurfraum s ein, so erhalten wir die Steighöhe $s = c^2 : 2g$. Dies ist aber nach 127. (5) der Weg, den ein Körper durchfallen muß, um die Geschwindigkeit c zu erlangen. Hiermit ist der Satz über die Steighöhe bewiesen; derselbe zeigt auch, daß ein senkrecht in die Höhe geworfener Körper mit derselben Geschwindigkeit wieder unten anlangt, mit welcher er zu steigen anfing. Eine senkrecht in die Höhe geschossene Büchsenkugel übt also bei ihrer Rückkehr dieselbe zerstörende Wirkung aus, die sie, direct auf einen ganz nahen Gegenstand geschossen, hätte ausüben können.

Die Wurfbewegung ist (abgesehen vom Luftwiderstande) parabolisch, wenn der Körper wagrecht hinaus oder schief in die Höhe geworfen wird. Denn wird ein Körper mit einer Geschwindigkeit von 12^m horizontal hinausgeworfen, so sind seine wagrechten Wege in 1, 2, 3, 4 .... Sec. $= 1 . 12^m, 2 . 12^m, 3 . 12^m, 4 . 12^m$ ...., verhalten sich also wie $1:2:3:4$ .... In denselben Zeiten aber fällt der Körper um $1 . 5^m, 4 . 5^m, 9 . 5^m, 16 . 5^m$ ....; es verhalten sich also seine verticalen Wege wie $1^2 : 2^2 : 3^2 : 4^2$ ....., also wie die Quadrate der wagrechten Wege. Folglich legt der Körper eine Bahn (Fig. 59) zurück, deren senkrechte Dimensionen oder Abscissen sich verhalten wie die Quadrate der zugehörigen wagrechten Dimensionen oder Ordinaten. Und die Curve, welche diese Eigenschaften hat, nennt man eben Parabel. In ähnlicher Weise läßt sich diese Bahn auch für einen schief aufwärts geworfenen Körper beweisen. Nur wirkt hier sowohl wie dort der Widerstand der Luft derartig schwächend auf die ursprüngliche Stoßkraft ein, daß die wagrechten Dimensionen der Curve immer kleiner werden, und daß daher der absteigende Ast der Curve steiler ist als der aufsteigende (Fig. 60). Doch läßt sich auch die gesetzmäßige Bildung dieser Curve berechnen, wenn man ein Gesetz über den Luftwiderstand in die Rechnung einführt. Diese Curve, die man ballistische Curve nennt, ist von großer Wichtigkeit in den Artilleriewissenschaften.

Fig. 59.

Fig. 60.

Besonders wichtig ist es, die Wurfhöhe h und die Wurfweite w für einen bestimmten Elevationswinkel α und eine bestimmte anfängliche Wurfgeschwindigkeit c zu kennen. Wir wollen diese Größen wenigstens für die rein parabolische Bahn bestimmen. Nach der Zeit t wäre der gerade Stoßweg $ab = ct$; da aber der Körper während dieser Zeit um $bf = {}^1/_2 gt^2$ fällt, so ist die erreichte Höhe zu dieser Zeit $df = bd - bf = ct. \sin\alpha - {}^1/_2 gt^2$, und die wagrechte Entfernung $ad = ct. \cos\alpha$. Die größte Entfernung oder Wurfweite ist erreicht, wenn die Höhe $= 0$ geworden ist, wenn also $ct \sin\alpha - {}^1/_2 gt^2 = 0$, oder wenn $t = 2c. \sin\alpha : g$. Setzen wir diesen Werth in die wagrechte Entfernung ein, so erhalten wir die Wurfweite $w = 2c^2 \sin\alpha \cos\alpha : g$ oder

$w = c^2 \sin 2\alpha : g$. Die größte Höhe oder Wurfweite hat der Körper in der halben Wurfzeit, also wenn $t = {}^1/_g . c \sin\alpha$, wodurch sich ergibt die Wurfhöhe $h = c^2 \sin^2\alpha : 2g$. Aus der Formel für die Wurfhöhe h ergibt sich, daß dieselbe den größten Werth erreicht, wenn $\sin\alpha$ am größten wird, wenn also $\alpha = 90^0$ ist, oder wenn der Körper senkrecht aufwärts steigt; dagegen erhält die Wurfweite ihren größten Werth, wenn $\sin 2\alpha$ ein Maximum ist, wenn also $2\alpha = 90^0$ oder $\alpha = 45^0$ ist.

131 Aufg. 194. Wie lange und wie hoch steigt eine Kugel, die mit einer Geschwindigkeit von 800^m senkrecht aufwärts geschossen wird, und mit welcher Geschwindigkeit langt sie wieder auf dem Boden an? $t = 80$ Sec.; $s = 32000^m$, $c = \sqrt{(2\,gs)} = 800^m$. — A. 195. Ein Zug von 12^m Geschwindigkeit verliert nach Dampfabschluß in jeder Sec. ${}^1/_{10}{}^m$ Geschwindigkeit; welche Geschw. hat der Zug nach 1 Min.; wann und nach welchem Wege kommt er zur Ruhe? Aufl.: Die Formeln für den Wurf senkrecht aufwärts $v = c - gt$ und $s = ct - {}^1/_2 gt^2$ gelten nach 16. für jede gleichförmig verzögerte Bewegung. In diesem Falle ist $g = 0{,}1$, daher nach 1 Min. $v = 12 - 60.\ 0{,}1 = 6^m$; für $v = 0$ ist $t = 12 : 0{,}1 = 120$ Sec. und $s = c^2 : 2g = 720^m$. — A. 196. Eine Kanonenkugel wird mit 600^m Geschwindigkeit unter einem Winkel von 15^0 in die Höhe geschossen; in welcher Entfernung erreicht sie den Boden? $w = c^2 \sin 2\alpha : g = 18000^m$. Für den Elevationswinkel 45^0 wäre die Wurfweite doppelt so groß $= 36000^m$. — A. 197. Unter welchem Winkel muß ein Körper in die Höhe geschossen werden, um bei einer Geschwindigkeit von 300^m eine Höhe von 1125^m zu erreichen? Aus $h = c^2 \sin^2\alpha : 2g$ folgt $\alpha = 30^0$.

b. Die drehende Bewegung.

132 **Winkelgeschwindigkeit und Trägheitsmoment.** Während bei einer fortschreitenden Bewegung alle Körpertheile identische Wege beschreiben, sind bei einer drehenden Bewegung oder Rotation die Wege der Moleküle nur einander ähnlich. Diese Wege sind meistens geschlossene Curven, am häufigsten Kreise. Die Größe derselben nimmt nach einer gewissen Richtung immer mehr ab, bis sie endlich gleich 0 wird. Die Punkte, welche bei einer drehenden Bewegung in Ruhe bleiben, bilden zusammen die Achse, deren Endpunkte Pole heißen. Manchmal ist die Achse nur eine gedachte Linie und nicht durch Körperatome gebildet; noch häufiger sind es nur einzelne Körper, die sich um die Achse drehen, so daß der größte Theil des Drehungsraumes leer ist, wie z. B. bei den Weltsystemen. Die senkrechte Entfernung eines Punktes von der Achse nennt man Radius oder Radius vector. Die Zeit, die der Punkt für seinen geschlossenen Weg braucht, heißt man Umlaufzeit; dieselbe ist für alle Punkte eines rotirenden Körpers gleich groß, während die Geschwindigkeiten dieser Punkte verschieden sind, da diese in gleichen Zeiten verschiedene Wege durchlaufen. Weil indessen alle Radien in der Umlaufzeit eine volle Drehung, einen Winkel von 360^0 zurücklegen, so müssen sie auch in einer Secunde gleiche Winkel beschreiben. Die Größe des Winkels, welchen ein Radius in einer Secunde beschreibt, nennt man die Winkelgeschwindigkeit; sie kann auch durch die Größe eines Bogens vom Radius 1 angegeben werden und gibt ein Maß für die Schnelligkeit der Drehung. Sie macht indessen auch die Bestimmung der wirklichen Geschwindigkeit aller Moleküle des rotirenden Körpers möglich, sowie deren Radien $r_1, r_2, r_3 \ldots.$ bekannt sind; denn ist die Winkelgeschwindigkeit $= \omega$, so sind nach einem bekannten geometrischen Satze die Geschwindigkeiten jener Moleküle $= r_1\omega, r_2\omega, r_3\omega \ldots.$

133 Um die Arbeit zu finden, welche für eine bestimmte Rotation nothwendig ist, müßte man nach dem ersten Satze über die lebendige Kraft, $ks = {}^1/_2\, mv^2$, die lebendige Kraft des rotirenden Körpers kennen. Da die Geschwindigkeiten der einzelnen Massenpunkte verschieden, aber durch die Winkelgeschwindigkeit ω darstellbar sind, so liegt der Wunsch nahe, die lebendige Kraft durch diese auszudrücken. Man könnte dieselbe durch ${}^1/_2 T\omega^2$ darstellen, wenn T eine ideale Masse wäre, die, in der Entfernung 1 von der Drehachse angebracht, bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ω auch dieselbe lebendige Kraft wie der rotirende Körper in sich trüge

Denn diese Masse T hätte dann die wirkliche Geschwindigkeit ω, also die lebendige Kraft $\frac{1}{2}T\omega^2$. Ließe sich eine solche ideale Masse finden, so würde dieselbe mit $\frac{1}{2}\omega^2$ multiplicirt, ihre eigene und daher auch die lebendige Kraft des rotirenden Körpers ergeben, und sie würde wegen derselben lebendigen Kraft auch dasselbe Beharrungsvermögen, dieselbe Trägheit, wie die rotirende Masse m besitzen; man nennt daher diese gedachte Masse das Trägheitsmoment; das Moment der idealen Masse ist nämlich gleich der Masse, da ihr Hebelarm = 1 ist. **Unter Trägheitsmoment versteht man also die ideale Masse, die in der Entfernung 1 von der Drehachse angebracht, bei gleicher Winkelgeschwindigkeit dieselbe lebendige Kraft wie der rotirende Körper besitzt.**

Um das Trägheitsmoment T zu finden, müssen wir daher sehen, welcher Ausdruck mit $\frac{1}{2}\omega^2$ multiplicirt die lebendige Kraft des rotirenden Körpers ergibt. Zu dem Zwecke bestimmen wir die lebendige Kraft desselben. Sind die Massen der einzelnen Moleküle $= m_1, m_2, m_3 \ldots.$, so sind ihre lebendigen Kräfte $= \frac{1}{2}m_1 r_1{}^2\omega^2$, $\frac{1}{2}m_2 r_2{}^2\omega^2$, $\frac{1}{2}m_3 r_3{}^2\omega^2$ u. s. w.; daher ist die lebendige Kraft des rotirenden Körpers $= \frac{1}{2}\omega^2(m_1 r_1{}^2 + m_2 r_2{}^2 + m_3 r_3{}^2 + \ldots.)$. Der Klammerausdruck ist die Summe der Producte aller Molekülmassen mit den Quadraten der Radien derselben; bezeichnen wir diese Summe mit Σmr^2, so ist die lebendige Kraft des rotirenden Körpers $= \frac{1}{2}\omega^2\Sigma mr^2$. Den Ausdruck aber, die ideale Masse, die mit $\frac{1}{2}\omega^2$ multiplicirt, die lebendige Kraft des Körpers gibt, haben wir Trägheitsmoment genannt. **Das Trägheitsmoment eines Körpers ist demnach gleich der Summe der Producte aller Molekülmassen mit den Quadraten der Radien derselben $= \Sigma mr^2$.**

Fig. 61.

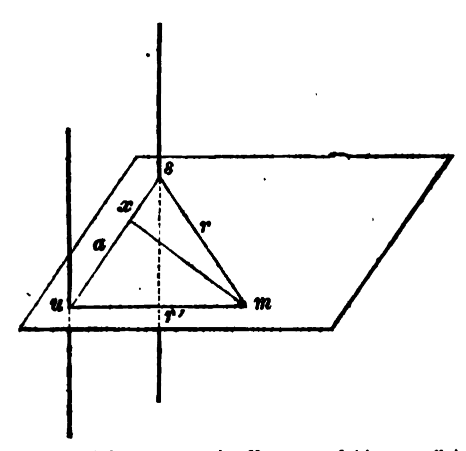
Da das Trägheitsmoment die Summe unendlich vieler Producte ist, so kann dasselbe im Allgemeinen nur durch die Anwendung der Infinitesimalrechnung gefunden werden. In einzelnen Fällen kann man es auch durch elementare Rechnung finden. Hat eine große Masse ein kleines Volumen und ist weit von der Drehachse entfernt, so ist das Trägheitsmoment, genau genug für die Praxis gleich dem Product der Masse mit dem Quadrat ihres mittleren Achsenabstandes. — Zwei rotirende Körper haben gleiches Beharrungsvermögen bei gleicher Winkelgeschwindigkeit, wenn ihre Trägheitsmomente gleich sind, wenn also $MR^2 = mr^2$, oder wenn ihre Massen sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate ihrer Achsenabstände. Diesen Satz und damit die ganze Lehre von den Trägheitsmomenten kann man experimentell nachweisen. An einer leichten Stange (Fig. 61), die in Decimeter getheilt ist, wird genau in der Mitte eine Tragschneide angebracht; zu beiden Seiten derselben in 1^{dm} Entfernung sind 1^{kg} schwere Bleilinsen a angeschraubt. Hängt man diese Vorrichtung an einem Pendelgestelle auf, so ist sie in indifferentem Gleichgewichte, also in jeder Lage in Ruhe. Bringt man aber unten noch eine Bleilinse b an, so ist jetzt stabiles Gleichgewicht; wenn man daher die Vorrichtung aus ihrer Lage dreht, so wird sie durch die Fallkraft des Gewichtes b wieder zurückgetrieben und gelangt nach einer Anzahl von Schwingungen wieder zur Ruhe. Aus der Zahl und Größe der in einer Minute stattfindenden Schwingungen kann man die Winkelgeschwindigkeit der Drehung berechnen. Schraubt man nun statt der Linsen a von 1^{kg} solche von $\frac{1}{4}{}^{kg}$ in 2^{dm} Entfernung von der Schneide an, so ist die Zahl der Schwingungen in 1 Min., also auch die Winkelgeschwindigkeit noch dieselbe wie vorher; folglich haben diese 4mal kleineren Linsen in der doppelten Entfernung dasselbe Beharrungsvermögen, womit der obige Satz nachgewiesen ist. Es ist auch leicht ersichtlich, daß die lebendige Kraft noch dieselbe ist wie vorher; denn die 4mal kleineren Massen haben die doppelte Geschwindigkeit erhalten; endlich ist auch die Arbeit, welche die lebendige Kraft erzeugte, in beiden Fällen dieselbe, nämlich die durch den Fall des Gewichtes b entwickelte Arbeit. — Auch mit Schleiermachers Centrifugalapparat (Külp 1. S. 166) lassen sich diese Gesetze nachweisen.

Das Beharrungsvermögen eines rotirenden Körpers ist um so größer, je größer sein Trägheitsmoment ist, je weiter also die Hauptmasse von der Drehachse entfernt ist. Eine schwere eiserne Welle hat daher ein geringes Beharrungsvermögen gegen ein Schwungrad

von gleichem Gewichte, dessen Hauptmasse in dem äußeren Ringe, dem Schwungringe liegt. In diesem großen Beharrungsvermögen liegt die Anwendung von Schwungrädern, die Schwankungen in dem Gange einer Maschine auszugleichen und sie über todte Punkte hinaus zu reißen.

Das Trägheitsmoment eines Körpers in Bezug auf irgend eine Achse ist gleich dem Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf eine parallele Schwerpunktachse vermehrt um das Product der Körpermasse mit dem Quadrat des Abstandes der beiden Achsen.

Fig. 62.



Beweis (Fig. 62). Nach einem bekannten geometrischen Lehrsatze ist $r_1^2 = r^2 + a^2 - 2ax$, also auch $mr_1^2 = mr^2 + ma^2 - 2max$, und durch Summation aller solcher für sämmtliche Moleküle m geltenden Gleichungen entsteht $\Sigma mr^2 + \Sigma ma^2 - 2a\,\Sigma mx$. Nun ist aber, wenn s der Schwerpunkt ist, nach dem Bestimmungssatze des Schwerpunktes (118) $\Sigma mx = 0$, und Σm ist die ganze Körpermasse M; also ist $\Sigma mr_1^2 = \Sigma mr^2 + Ma^2$. Der erste Ausdruck ist aber das Trägheitsmoment in Bezug auf die parallele durch den Schwerpunkt s gehende Masse, womit der Satz bewiesen ist.

134

Aufg. 198. Das Trägheitsmoment einer Linie in Bezug auf ihren Endpunkt zu finden. Aufl.: Die Linie l werde in n (unendlich viele) Theilchen zerlegt von der Länge d; dann ist die Masse eines solchen $= md : l$, und daher das Trägheitsmoment der Linie $T = (md : l)\,(d^2 + 2^2 d^2 + 3^2 d^2 + \ldots) = md^3\,(1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots n^2) : l$. Nun ist nach der höheren Math. $1^2 + 2^2 + 3^2 + \ldots + n^2 = {}^1/_6 . n\,(n+1)\,(2n+1)$; ist hierin n = unendlich, so verschwindet der Summand 1, und der Ausdruck wird $= {}^1/_3\,n^3$; also ist $T = {}^1/_3 . md^2n^3 : l$. Nun ist weiter $dn = l$, also $T = {}^1/_3\,ml^2$. Geht die Achse durch den Schwerpunkt, so muß man nach dem so eben entwickelten Satze hiervon das Product der Masse mit dem Quadrat der Abstände beider Achsen subtrahiren; also ist $T = {}^1/_3 . ml^2 - m . ({}^1/_2\,l)^2 = {}^1/_{12}\,ml^2$. — A. 199. Das Trägheitsmoment einer rechteckigen Platte von der Masse m und den Seiten a und b zu finden. Aufl.: Die Platte werde in n gleiche zu a parallele Streifen getheilt; die Masse eines solchen ist ${}^1/_n . m$, und sein Trägheitsmoment in Bezug auf seine Schwerpunktachse $= {}^1/_{12} . {}^1/_n . ma^2$, in Bezug aber auf die durch den Mittelpunkt der Platte gehende Achse nach obigem Satze $= {}^1/_{12n} . ma^2 + {}^1/_n . md^2$, wenn d der Abstand jenes Streifens von dieser Achse ist. Sind die Abstände der folgenden Streifen $d_1, d_2, d_3 \ldots$, so ist das Trägheitsmoment jedes Streifens durch einen ganz analogen Ausdruck zu finden; daher ist das Trägheitsmoment der ganzen Fläche oder der n Streifen

$$T = \frac{n}{12 . n} \cdot ma^2 + \left(\frac{1}{n} \cdot md^2 + \frac{1}{n} \cdot md_1^2 + \frac{1}{n} \cdot md_2^2 + \frac{1}{n} \cdot md_3^2 + \ldots\right)$$

Der Klammerausdruck ist aber offenbar das Trägheitsmoment einer schweren Linie b in Bezug auf eine durch den Schwerpunkt gehende Achse, welche von den einzelnen Punkten um $d, d_1, d_2, d_3 \ldots$ entfernt ist, und welches nach Aufg. 198 gleich ${}^1/_{12} . mb^2$ ist; daher ist endlich $T = {}^1/_{12} . m\,(a^2 + b^2)$. Geht die Achse durch einen Eckpunkt der Platte, so ist hierzu nach obigem Satze ${}^1/_4 . m\,(a^2 + b^2)$ zu addiren; folglich ist dann $T = {}^1/_3 . m\,(a^2 + b^2)$. — A. 200. Das Trägheitsmoment eines rechteckigen Stabes mit den Kanten a, b und c zu finden. Aufl.: Man theile den Körper in n Streifen durch Ebenen senkrecht zu c. Für einen solchen Streifen ist in Bezug auf die Schwerpunktachse $T = {}^1/_{12} . m/n . (a^2 + b^2)$, da m die Masse des ganzen Körpers, also m/n die Masse eines Streifens; daher ist für den ganzen Körper $T = {}^1/_{12} . m . (a^2 + b^2)$. Ist die Kante c selbst die Achse, so ist $T = {}^1/_3 . m\,(a^2 + b^2)$. Wird die Kante b = o, so ist das Parallelepiped ein Rechteck, dessen Seiten a und c sind, und dessen Seite c entweder selbst die Achse oder parallel zu der durch die Mitte gehenden Achse ist. In diesen beiden Fällen sind dann die Trägheitsmomente $= {}^1/_3 . ma^2$ und $= {}^1/_{12} . ma^2$. Hat man nicht die Masse m, sondern nur die Seiten a und c, so ist $m = ac$, also in dem letzten Falle $T = {}^1/_{12} . a^3c$. — A. 201. Die relative Festigkeit eines rechteckigen Balkens von der Länge l, der Breite b und der Höhe

h zu finden. Aufl.: Die relative Festigkeit muß gleich derjenigen Kraft sein, welche in dem gefährlichsten Querschnitte des Balkens eine Spannung hervorruft, durch welche die Fasern brechen. Der gefährlichste Querschnitt ist an einem nur einerseits festgehaltenen, eingemauerten oder eingespannten Balken derjenige, an welchem der Stab eingespannt ist, weil für diesen die Kraft P das größe Moment Pl hat. Soll der Balken brechen, so müssen die Momente aller in jenem Querschnitte stattfindenden Spannungen zusammen gleich dem Moment Pl der brechenden Kraft sein. Die in dem Querschnitte 1 bei dem Bruche überwundene Spannung ist bekanntlich gleich dem Coëfficienten der absoluten Festigkeit $= f$; daher ist die in dem ganzen Querschnitte q einer Faser herrschende Spannung $= fq$. Ist nun diese Faser um d von der neutralen Faser, welche ja die Drehachse der sich biegenden Fasern bildet, entfernt, so ist das Moment der Faserspannung $= qd.f$. Für andere Fasern, deren Querschnitte $q_1, q_2, q_3 \ldots$ sind, und welche bezüglich die Abstände $d_1, d_2, d_3 \ldots\ldots$ von der neutralen Faser haben, sind analog diese Momente $= q_1 d_1 . f_1, q_2 d_2 . f_2, q_3 d_3 . f_3 \ldots$ — Weil nun die Ausdehnungen und Verkürzungen und daher auch die Spannungen der Fasern den Abständen von der neutralen Faser proportional sind, so ist $f_1 : f = d_1 : d$, ebenso $f_2 : f = d_2 : d$, ebenso $f_3 : f = d_3 : d \ldots$, woraus $f_1 = fd_1 : d, f_2 = fd_2 : d, f_3 = fd_3 : d \ldots$; die Momente der Faserspannungen sind daher $fq_1d_1^2 : d, fq_2d_2^2 : d, fq_3d_3^2 : d \ldots\ldots$ — Die Summe aller dieser Momente ist $f(qd^2 + q_1d_1^2 + q_2d_2^2 + q_3d_3^2 + \ldots\ldots) : d$. Der Klammerausdruck aber enthält das Trägheitsmoment T des rechteckigen Querschnittes; folglich ist die Momentensumme aller Faserspannungen $= fT : d$, und da diese für den Bruch dem Moment der brechenden Kraft P gleich sein muß, so ergibt sich die Gleichung $Pl = fT : d$. Für einen rechteckigen Balken ist nach A. 199 $T = \frac{1}{12} h^3 b$, und $d = \frac{1}{2} h$, da die eben gefundene Gleichung für die äußerste Faser gelten muß. Durch Substitution dieser Werthe entsteht $P = f/6 . bh^2 : l$, eine Formel, die wie schon in 71. verwendet haben. Dieses Beispiel deutet auf die Wichtigkeit der Trägheitsmomente in der Festigkeitslehre hin.

Nach dem Satze von Reuleaux und Moll (s. 64.) soll die Faserspannung nicht über die Elasticitätsgrenze hinausgehen; statt f muß also der Tragmodul t gesetzt werden, und diese Spannung darf höchstens in der äußersten Faser stattfinden. In der Gleichung $Pl = tT : d$ bedeutet d daher den Abstand der äußersten Faser und P die biegende Kraft. Da diese Gleichung ganz unabhängig von der Form des Balkens ist, so gilt sie allgemein und enthält einen wichtigen Satz der Festigkeitslehre: Das Moment der biegenden Kraft ist für die Elasticitätsgrenze gleich dem Product aus dem Tragmodul mit dem Trägheitsmoment dividirt durch den Abstand der äußersten Faser von der neutralen Faser.

135 1. **Die Pendelbewegung** (Galilei 1602). Ein Pendel ist jeder Körper, der um einen Punkt außerhalb seines Schwerpunktes drehbar aufgehängt ist. Das einfachste Pendel ist das mathematische: ein schwerer Punkt, der durch eine gewichtlose Linie mit dem Drehpunkte verbunden ist. Kein wirkliches Pendel ist ein mathematisches; die wirklichen Pendel werden physische genannt; dem nur gedachten mathematischen Pendel kommt am nächsten eine kleine Kugel von Platin, Gold oder Blei, die an einem feinen Faden hängt.

Bringt man ein solches mathematisches Pendel aus seiner Gleichgewichtslage und läßt es alsdann los, so ist der Schwerpunkt nicht mehr unterstützt; folglich muß das Pendel fallen. Die Kugel beschreibt hierbei einen Kreisbogen, weil sie immer gleichweit vom Aufhängepunkte entfernt ist; diesen Bogen kann man sich aus unendlich vielen kleinen geraden Elementen bestehend denken, von denen das tiefste wagrecht ist, und die anderen eine um so größere Neigung gegen den Horizont haben, je höher sie liegen: sie können alle als schiefe Ebenen von nach unten hin abnehmender Neigung angesehen werden. In jedem Moment durchläuft die Pendelkugel eine solche schiefe Ebene, erfährt daher in jedem Moment nach 128. die Acceleration $g \sin \alpha$. An dem obersten Punkte ist $\sin \alpha$ und daher auch diese Acceleration am größten; dieselbe nimmt immer mehr ab, bis sie in dem tiefsten Punkte $= 0$ ist. Weil nun aber nach dem Gesetze der Trägheit die in jedem früheren Moment erlangte Geschwindigkeit erhalten bleibt und in jedem folgenden Moment eine neue, wenn auch immer kleiner werdende hinzukommt, so muß die Geschwindigkeit des Pendels fortwährend, aber immer weniger, zunehmen; die Pendelbewegung ist beim Niederfallen eine ungleichförmig beschleunigte Bewegung. In dem tiefsten Punkte der Bahn ist die Geschwindigkeit am größten. Mit dieser Ge-

schwindigkeit muß das Pendel über den tiefsten Punkt hinausgehen und daher auf der anderen Seite in die Höhe steigen. Während dieses Steigens verliert das Pendel in jedem Moment genau dieselbe Geschwindigkeit, die es auf der entsprechenden schiefen Ebene des Niederganges gewonnen hat; folglich muß, abgesehen von den Widerständen, das Pendel mit ungleichförmig verzögerter Bewegung ebenso hoch steigen, als es heruntergefallen ist. Die eben geschilderte Bewegung nennt man *eine* Schwingung oder Oscillation, die Größe des durchlaufenen Bogens Schwingungsbogen, die hierzu nöthige Zeit Schwingungszeit. Ein mathematisches Pendel würde, einmal in Bewegung gesetzt, ins Unendliche weiter schwingen, weil es nach Beendigung der ersten und jeder folgenden Schwingung immer wieder in derselben Lage wäre, wie am Anfange der ersten Schwingung, und weil ihm keine Widerstände entgegenwirken. Ein physisches Pendel aber hat den Widerstand der Luft und die Reibung an den Aufhängepunkten zu überwinden, wodurch seine Fallkraft immer mehr geschwächt wird, so daß die Schwingungen immer kleiner werden und endlich ganz aufhören.

136 Gesetze der Pendelbewegung. 1. **Die Schwingungszeit ist für kleine Schwingungsbogen unabhängig von der Größe derselben.** 2. **Die Schwingungszeit ist proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge.** Das erste Gesetz sagt aus, daß ein hoch gehobenes Pendel für seinen großen Weg nur dieselbe Zeit braucht wie ein wenig gehobenes für seinen kleinen Weg; es ist dies erklärlich; denn das hoch gehobene Pendel fällt steiler herab, hat daher eine größere Geschwindigkeit als das andere. Das zweite Gesetz läßt sich aus dem sechsten Fallgesetze ableiten; denn nach diesem verhalten sich die Schwingungszeiten wie die Quadratwurzeln aus den Schwingungsbogen; statt der Schwingungsbogen kann man die Pendellängen setzen, weil sich zwei Bogen von gleichen Centriwinkeln wie ihre Radien verhalten, welche hier die Pendellängen sind. Wir werden sogleich beweisen, daß die Schwingungszeit $t = \pi \sqrt{(l:g)}$ ist. In dieser Formel kommt der Schwingungsbogen gar nicht vor, und die Wurzel aus der Pendellänge steht im Zähler; folglich ist mit dieser Formel bewiesen, daß die Schwingungszeit unabhängig ist vom Schwingungsbogen und direct proportional der Quadratwurzel aus der Pendellänge. Man kann diese Sätze nachweisen mit an Fäden aufgehängten Kugeln. Für kleine Schwingungsbogen macht ein solches Pendel in der ersten Minute ebenso viele Schwingungen wie in der letzten; für größere Bogen aber findet dies nicht mehr statt, also gilt das erste Gesetz nur mit der zugefügten Einschränkung, etwa bis 10°. — Hat man Pendel, von denen das zweite 4 mal, das dritte 9 mal so lang ist als das erste, so macht das zweite in einer Minute halb, das dritte den 3ten Theil so viel Schwingungen als dieses, folglich dauern die Schwingungen des zweiten 2 mal, die des dritten 3 mal so lang, womit der zweite Satz nachgewiesen ist.

137 **Strengerer Beweis der zwei Gesetze.** Die Formel für die Schwingzeit $t = \pi \sqrt{(l:g)}$ ist nicht genau, sondern muß eigentlich heißen $t = \pi \sqrt{l:g}\left\{1 + (^1/_2)^2 \left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \cdot \left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^4 + \left(\frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}\right)^2 \left(\sin\frac{\alpha}{2}\right)^6 + \ldots\right\}$, wo α den dem halben Schwingungsbogen entsprechenden Winkel, den sogenannten Elongationswinkel bedeutet; indessen wollen wir doch jene für kleinere Winkel hinreichend genaue und sehr wichtige Formel, welche auch die beiden Gesetze enthält, nach Baumgartners Methode beweisen. Ist das Pendel von b bis e (Fig. 63) gefallen, so hat es senkrecht den Weg ir zurückgelegt, folglich hat es nach 128. die Geschw. $v = \sqrt{(2g \cdot ir)}$. Mit dieser Geschw. geht es eine unendlich kleine Zeit τ weiter und beschreibt den Weg $ef = v \cdot \tau = \tau \cdot \sqrt{(2g \cdot ir)}$. Suchen wir nun einen anderen Werth für dieses kleine Element aus dem geometrischen Zusammenhange der Figur. Es ist $\triangle$ efk $\sim$ aer, folglich ef : kf = ae : er, woraus

$ef = ao \,.\, kf : er = l \,.\, rh : er$. Nun ist aber nach einem bekannten geometrischen Satze $er^2 = cr\,(2l - cr)$, wofür wir nach Voraussetzung kleiner Elongationswinkel setzen dürfen $er^2 = cr \,.\, 2l$ oder $er = \sqrt{(cr \,.\, 2l)}$. Wenn wir diesen Werth in den für ef einsetzen, so wird $ef = l \,.\, rh : \sqrt{(2l \,.\, cr)}$. Nun haben wir zwei Werthe für ef; durch Gleichsetzung derselben entsteht die Gleichung $\tau\sqrt{(2g \,.\, ir)} = l \,.\, rh : \sqrt{(2l \,.\, cr)}$ oder $\tau\sqrt{(2g \,.\, ir.)}\ \sqrt{(2l \,.\, cr)} = l \,.\, rh$ oder $2\tau l\sqrt{(g \,.\, ir \,.\, cr)} = rh\,\sqrt{l}$. In dieser Gleichung für τ ist das Product $ir \,.\, cr$ wegzuschaffen. Zu diesem Zwecke beschreiben wir über ic einen Halbkreis; dann ist $ir \,.\, cr = rn^2$ und $\sqrt{(ir \,.\, cr)} = rn$. Durch Einsetzung dieses Werthes erhält unsere Gleichung die Form $2\tau \,.\, rn \,.\, \sqrt{g} = rh \,.\, \sqrt{l}$ oder auch $2\tau \,.\, \sqrt{g} = (rh : rn)\,\sqrt{l}$. Das Verhältniß $rh : rn$ oder $qp : rn$

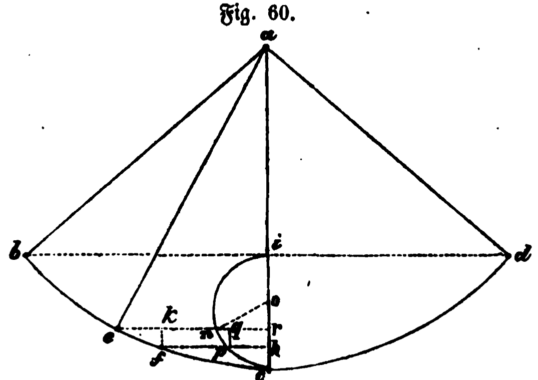


Fig. 60.

können wir durch die Aehnlichkeit der Dreiecke npq und nor umwandeln; denn hieraus folgt $pq : pn = rn : on$ oder $pq : rn = pn : on$. Durch Substitution des zweiten Verhältnisses für das erstere in unsere Gleichung für τ folgt $2\tau \,.\, \sqrt{g} = (pn : on)\,\sqrt{l}$. Hieraus ergibt sich ein Werth für τ, die unendliche kleine Fallzeit durch das Element ef. Wenn wir für andere Elemente ebenso verfahren, so erhalten wir ganz analoge Gleichungen für die Fallzeiten, in denen immer g, l und on dieselben Werthe bedeuten und nur pn jedesmal an einer anderen Stelle liegt; durch Summirung aller dieser Fallzeiten entsteht die halbe Schwingzeit. Da nun aus unserer Gleichung für τ sich ergibt $\tau = \frac{1}{2}\sqrt{(l : g)}\,(pn : on)$, so ist $t/2 = \frac{1}{2}\sqrt{(l : g)}\,(\Sigma pn : on)$. Die Summe aller pn oder Σpn aber ist der Halbkreis um o, gleich $\pi \,.\, on$; folglich ist $\Sigma pn : on = \pi$ und daher $t/2 = \pi/2\,\sqrt{(l : g)}$; folglich ist die ganze Schwingzeit $t = \pi\sqrt{(l : g)}$. Eine etwas genauere Formel ist $t = \pi\sqrt{(l : g)}\,(1 + \frac{1}{16}\alpha^2)$, welche sich leicht aus der oben angeführten ganz genauen Formel ergibt. Die Punktformel $t : \pi\,\sqrt{(l : g)}$ bezeichnen wir mit . . . . (21)

Die Zahl der Schwingungen, die ein Pendel in einer Minute oder in einer Stunde macht, wird eben soviel mal größer als die Schwingzeit kleiner wird; sie steht in umgekehrtem Verhältnisse zu der Schwingzeit. Die Quadrate der Schwingzeiten verhalten sich aber nach dem zweiten Satze direct wie die Pendellängen; demnach kann man diesem Satze auch folgende Form geben: **Die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten sich umgekehrt wie die Pendellängen** oder $n^2 : n_1^{\,2} = l_1 : l$ . . . . . (22)

138 **Das physische Pendel.** Jedes wirkliche oder physische Pendel, gewöhnlich aus einer Stange mit verschiebbaren Gewichten geformt, besteht aus unendlich vielen mathematischen Pendeln; denn ein solches enthält unendlich viele Körpermoleküle, schwere Punkte, von denen jeder durch die übrigen mit dem Aufhängepunkte in Verbindung steht, also ein mathematisches Pendel bildet. Die dem Aufhängepunkte näheren Moleküle bilden kleine Pendel, welche nach dem zweiten Satze schnell zu schwingen streben; die entfernteren Moleküle bilden lange Pendel, haben also das Bestreben langsame Schwingungen zu machen. Durch die feste Verbindung der näheren und entfernteren Punkte mit einander müssen die näheren in ihrer natürlichen Bewegung verzögert, die entfernteren beschleunigt werden. Zwischen den verzögerten und den beschleunigten Molekülen muß es daher einen Punkt geben, der weder verzögert, noch beschleunigt wird, der also gerade so schwingt, als ob er ganz allein vorhanden wäre und so ein mathematisches Pendel bilden würde. Man nennt diesen Punkt den **Schwingungspunkt** und seine Entfernung vom Aufhängepunkte die **reducirte Länge des physischen Pendels**, weil das physische Pendel genau so schwingt wie das mathematische Pendel von dieser Länge. Wenn man daher den Schwingungspunkt und hierdurch die reducirte Länge von Pendeln beliebiger Formen kennt, so kann man nach Formel (21) auch die Schwingzeit desselben finden, und kann umgekehrt physische Pendel anfertigen, die eine im

Voraus bestimmte Schwingungszeit haben; beträgt z. B. die Schwingungszeit eine Secunde, so nennt man das Pendel ein Secundenpendel. Es ist daher die Berechnung der reducirten Pendellänge die erste Aufgabe beim physischen Pendel.

139 **Gesetze des physischen Pendels.** 1. Die reducirte Länge des physischen Pendels ist gleich dem Quotient des Trägheitsmoments des Pendels durch das statische Moment seiner Masse.

Beweis. Denken wir uns in dem Schwingungspunkte, dessen Abstand vom Aufhängepunkte gleich der gesuchten Länge x ist, eine Masse m' concentrirt, welche dieselbe Winkelgeschwindigkeit wie das Pendel besitzt, so muß ihr Trägheitsmoment $m'x^2$ gleich dem Trägheitsmoment T des Pendels sein, woraus $m' = T : x^2$ . . . . . I.

Ist nun die Masse des Pendels = m, also sein Gewicht = mg, und der Abstand des Schwerpunktes vom Aufhängepunkte = d, so ist das statische Moment des Gewichtes = mgd; soll nun eine in dem Schwingungspunkte auf die Masse m' wirkende Kraft k dieselbe Wirkung hervorbringen wie dieses Gewicht, so müssen die statischen Momente der beiden Kräfte einander gleich sein; also ist $kx = mgd$, woraus $k = mgd : x$ . . . . . II.

Die Acceleration a aber, welche durch eine Kraft k in einer Masse m' hervorgebracht wird, ist nach Fl. (8) bekanntlich $= k : m'$; also ist nach unseren Werthen I und II $a = (mgd : x) : (T : x^2) = mgdx : T$. Die im Schwingungspunkte concentrirte Masse soll nun wie das ganze Pendel schwingen, folglich muß ihre Acceleration gleich der der Schwere sein; also ist $mgdx : T = g$, woraus $x = T : md$, was zu beweisen war.

Practisch findet man die ungefähre red. Länge eines physischen Pendels, wenn man vor dasselbe ein mathematisches Pendel so hängt, daß die Aufhängepunkte in einer Wagerechten liegen, und wenn man nachher das letztere so lange verkürzt oder verlängert, bis die beiden Pendel gleich schwingen, coincidiren; dann findet sich der Schwingungspunkt genau hinter der schwingenden Kugel. Bestehen Pendel aus leichten Stangen mit schweren Linsen, so liegt der Schwingungspunkt in der Linse; durch Verschieben derselben läßt sich daher die Länge und die Schwingzeit des Pendels ändern.

2. Der Schwingungspunkt liegt tiefer als der Schwerpunkt.

Beweis. Nach dem Satze S. 141 ist das Trägheitsmoment T des Pendels gleich dem Trägheitsmoment T' in Bezug auf eine parallele Schwerpunktachse vermehrt um md^2; also ist $T = T' + md^2$; hieraus ergibt sich nach dem ersten Gesetze $x = (T' + md^2) : md = d + (T' : md)$, d. h. x ist immer größer als d, der Abstand des Schwerpunktes.

3. Wenn man den Schwingungspunkt mit dem Aufhängepunkte vertauscht, so wird die Schwingungszeit nicht geändert. Man nennt ein Pendel, das auch an seinem Schwingungspunkte eine Schneide trägt, und an welchem man daher Schwingungspunkt und Aufhängepunkt vertauschen kann, ohne die Schwingungszeit zu ändern, ein Reversionspendel.

Beweis. Der Schwingungspunkt ist vom Schwerpunkte um x—d entfernt; wenn wir das Pendel im Schwingungspunkte aufhängen, so ergibt sich hiernach seine reducirte Länge x', indem wir in dem Werthe für x aus dem vorigen Beweise an die Stelle von d den jetzt geltenden Werth x—d setzen; dann ist $x' = x - d + [T' : m\,(x - d)]$. Nun folgt gerade aus jenem Werthe für x die Gleichung $x - d = T' : md$; setzen wir diesen Werth in den für x' ein, so ergibt sich $x' = \frac{T'}{md} + \frac{T'.\,md}{m\,T'} = \frac{T'}{md} + d$, welcher Werth mit dem von x im vorigen Beweise vollkommen übereinstimmt. Wenn nun die reducirte Länge zweier Pendel dieselbe ist, so ist auch ihre Schwingungszeit dieselbe. Nach Bohnenberger (1811) läßt sich jede leichte Stange, welche an einem Ende und um ein Drittel ihrer Länge vom anderen Ende entfernt Aufhängeschneiden und zwischen denselben verschiebbare Gewichte trägt, durch Verschieben der Gewichte zu einem Reversionspendel machen.

Aufg. 202. Den Schwingungspunkt einer dünnen Stange zu finden. Aufl.: Nach 134. Aufg. 200 ist $T = \frac{1}{3} . m . (2d)^2 = \frac{4}{3}\,md^2$. Dividirt man dies durch md, so ist $x = \frac{4}{3}d$ d. h. der Schwingungspunkt ist um $\frac{1}{3}$ vom unteren Ende entfernt. — A. 203. Wie groß ist die Schwingzeit eines Pendels, dessen Schwingungspunkt um 1^m vom Aufhängepunkt entfernt ist: Aufl.: $t = \pi \sqrt{(l : g)} = 0{,}9927$ Sec. = sehr nahe 1 Sec. — A. 204. Wie lang muß eine Stange sein, die halbe Secunden schwingen soll? Aufl.: $\frac{1}{2} = \pi \sqrt{(l : g)}$ hieraus $l = 0{,}249^m$; nach Aufg. 202 noch die Hälfte hinzu, gibt die Länge der Stange $= 0{,}3735^m$. — A. 205. Welche Schwingungen würde ein Pendel von dieser Länge auf der Sonne machen? Aufl.: $t = \pi \sqrt{(l : 28g)} = 0{,}0942$ Sec. Das Pendel schwingt also Zehntel-Secunden; überhaupt wächst die Schnelligkeit oder auch die Zahl der Schwing-

ungen mit der Quadratwurzel aus der Schwerkraft. — A. 206. Wie lang müßte ein Secundenpendel auf der Sonne sein? Aufl.: $1 = 3{,}14 \sqrt{(l:280)}$; hieraus l = nahezu 29m. — A. 207. Wie viel würde eine vom Aequator auf den Pol versetzte Uhr täglich vorgehen? Aufl.: 3½ Min.

140 **Anwendung des Pendels.** 1. Zur Regulirung der Uhren (Huyghens 1673). Die Uhren werden entweder durch fallende Gewichte oder durch zusammengerollte Spiralfedern getrieben; nach dem Gesetze der Trägheit muß sowohl die Fallbewegung, als auch das Aufrollen der Feder immer schneller werden. Die Anwendung des Pendels verhütet diese Unregelmäßigkeit. Das Pendel ist also ebenso der Regulator der größeren Uhren, wie die Unruhe und Spirale derjenige der Taschenuhren; die Verbindung zwischen dem Regulator und dem Treibwerke nennt man die Hemmung oder das Echappement. Die älteste und gewöhnlichste Hemmung für Pendeluhren ist der Graham'sche Haken (Fig. 64). Auf der Drehachse a des Pendels p sitzt ein vförmiger Doppelhaken h, welcher abwechselnd in ein auf der Achse der Seil- oder Federtrommel s sitzendes Rad r eingreift, wenn er durch das schwingende Pendel hin- und herbewegt wird. Hierdurch wird die Drehung der Trommel und der Fall des Gewichtes g bei jeder Schwingung einmal gehemmt, der Fall muß nach jeder Hemmung neu beginnen und geschieht daher regelmäßig. Zugleich übt das Rad bei jeder Fortbewegung einen Rückstoß auf den Haken und dadurch auf das Pendel aus, wodurch die Hindernisse der Pendelbewegung aufgehoben werden. Näheres über Uhren in der Physik des Himmels, 582.

2. Zum Tactmessen mittels des Metronoms (Mälzel). Das Metronom besteht aus einem kleinen Pendel mit einem festen unteren und einem verschiebbaren oberen Gewichte; der Drehpunkt ist zwischen beiden Gewichten. Das Trägheitsmoment der beiden Massen ist $md^2 + m_1 d_1^2$, das statische Moment $md - m_1 d_1$; folglich wird durch das zweite Gewicht der Zähler der reducirten Länge (von x in 139.), größer, der Nenner aber kleiner; daher wird die Schwingzeit trotz der Kleinheit des Pendels ziemlich groß, etwa ½ Secunde. Durch Verschiebung des oberen Gewichtes nach oben wächst der Zähler mehr, als der Nenner abnimmt, folglich wird die reducirte Pendellänge und damit die Schwingzeit größer, beim Hinabrücken kleiner. Mälzel hat das Pendel mit einer ähnlichen Einrichtung, wie Fig. 64 verbunden, wodurch nicht nur die Pendelbewegung lange erhalten sondern auch hörbar gemacht wird. An dem Pendel ist eine Skale angebracht für das Schiebgewicht. In den musikalischen Werken steht gewöhnlich angegeben, an welche Zahl das Schiebgewicht gerückt werden muß, damit das Pendel Viertel, Achtel oder dergl. schlägt und hierdurch das vom Componisten beabsichtigte Tempo des Musikstückes feststellt.

Fig. 64.



3. Zum Messen sehr großer Geschwindigkeiten (Hutton 1770). Gegen den, aus einem mit Eisen beschlagenen Holzblocke von 60 bis 100 Centner bestehenden Gewichtskörper eines Pendels (ballistisches Pendel) wird eine Kugel geschossen und dadurch das Pendel zum Ausschlage gebracht. Nach den Gesetzen des Pendels und des Stoßes unelastischer Körper kann man aus der Größe des Ausschlages die Geschwindigkeit der Kugel berechnen.

4. Zum Nachweise, daß alle Körper gleich schwer sind (Newton 1680 und Bessel 1832). Pendel von gleicher Länge aus dem verschiedensten Stoffe angefertigt machen in gleichen Zeiten gleich viele Schwingungen, haben also gleiche Schwingzeit; folglich muß auch g d. i. die Fallbeschleunigung in 1 Sec. für alle Stoffe gleich groß sein.

5. Zum Nachweise, daß die Schwere auf Bergen und im Erdinneren kleiner ist als auf der ebenen Oberfläche. Ein und dasselbe Pendel macht auf einem Berge oder in einem Schachte weniger Schwingungen als auf der ebenen Erdoberfläche.

6. Zum Nachweise, daß die Schwere vom Aequator nach den Polen hin zunimmt (Richer in Paris und Cayenne 1672). Ein und dasselbe Pendel macht in gleichen Zeiten um so mehr Schwingungen, je weiter man vom Aequator nach den Polen hinkommt.

7. Zum Bestimmen der Größe der Acceleration g und dadurch zum Messen der Schwerkraft der Erde. Läßt man ein Pendel von beliebiger Länge l eine gewisse Zeit schwingen und zählt die Schwingungen, so kann man die Schwingzeit t be-

selben finden. Dann kennt man in der Pendelformel (21) alle Größen bis auf g und kann daher g berechnen. Ist z. B. in Paris ein Secundenpendel 0,9933^m lang, so ergibt sich aus jener Formel $g = \pi^2 . l : t^2 = 3{,}1416^2 . 0{,}9933 : 1^2 = 9{,}808^m$. (Methode von Borda 1700, von Kater 1818.)

8. Zum Vergleichen der Schwerkraft an verschiedenen Orten. Läßt man ein und dasselbe Pendel an verschiedenen Orten schwingen, so ist an dem einen Orte $t = \pi \sqrt{(l : g)}$ und an dem anderen $t_1 = \pi \sqrt{(l : g_1)}$ oder $t^2 = \pi^2 l : g$ u. $t_1^2 = \pi^2 l : g_1$, woraus $g : g_1 = t_1^2 : t^2 = n^2 : n_1^2$; es verhalten sich also die Schwerkräfte für die zwei verschiedenen Orte direct wie die Quadrate der Schwingungszahlen eines und desselben Pendels. Durch diese Methode hat man die früher angegebenen Unterschiede der Schwerkraft auf der Erdoberfläche gefunden und dadurch die Abplattung der Erde gemessen.

9. Zum Wägen der Erde und hierdurch auch zum Wägen der Sonne, der Planeten u. s. w. — Maskelyne und Hutton beobachteten 1775, um wie viel ein Pendel durch den Berg Shehallien aus seiner lothrechten Lage abgelenkt wird, und fanden hieraus die Dichte der Erde = 4,5; Cavendish (1797) ließ ein wagrechtes Doppelpendel (Drehwage) durch schwere Bleikugeln anziehen und fand hieraus die Dichte der Erde = 5,5; Carlini (1824) verglich die Länge des Secundenpendels auf dem Mont-Cenis mit derjenigen in Bordeaux und fand hieraus die Erddichte = 4,4; Reich in Freiberg (1838) und Airy in Harton (1854) ließen Pendel auf der Erdoberfläche und in tiefen Schachten schwingen und berechneten hieraus die Dichte der Erde, der erstere = 5,5, der letztere = 6,5. Näheres in der Physik der Erde, 538.

10. Zur Angabe der Secunden. Zu diesem Zwecke fertigt man ein sogenanntes Secundenpendel, wozu man zunächst nach der in 139. betrachteten Methode ein Reversionspendel construiren muß. Man läßt dieses z. B. eine Minute lang schwingen; die Zahl der Schwingungen sei n und der Abstand der Schneiden = l, die gesuchte Länge des Secundenpendels sei x. Da die Schwingungszahl desselben in 1 Min. = 60, so muß nach Formel (22) die Proportion stattfinden: $x : l = n^2 : 60^2$, woraus man x berechnen und daher ein mathematisches oder auch mit Hülfe von 139. ein physisches Pendel anfertigen kann, das Secunden schwingt. Hierdurch hat man erfahren, daß das Secundenpendel für verschiedene Orte der Erde eine verschiedene Länge haben muß, und daß die Länge desselben von dem Aequator nach den Polen hin ganz allmälig zunimmt, wodurch abermals nachgewiesen wurde, daß die Schwere vom Aequator nach den Polen hin größer wird. Auf dem Aequator, also in 0° geogr. Br. ist die Länge des Secundenpendels = 0,991^m, in 10° = 0,9911, in 20° = 0,9917, in 30° = 0,9925, in 40° (Newyork) = 0,9931, in 50° (Mainz) = 0,9940, in 60° = 0,9949, in 70° = 0,9956, in 80° = 0,9960^m. Als Durchschnittszahl merke man sich die leicht zu behaltende Zahl 0,9933^m, welche ungefähr für Mailand gilt, und beachte, wie außerordentlich nahe die Länge des Secundenpendels derjenigen des Meters kommt. — Wenn man zuerst die Größe von g nach Nr. 7 für einen Ort genau bestimmt hat, so kann man auch mittels der Formel für die Schwingzeit die Länge des Secundenpendels berechnen und dadurch eine Bestätigung der obigen Werthe erhalten. Dieselben ergeben sich auch aus einer Formel, die man aus den Beobachtungen gefunden hat; ist α die geogr. Br., so ist $x = 0{,}991\,033 + 0{,}005\,638 \sin^2 \alpha$ Meter.

11. Zum Nachweise der Achsendrehung der Erde (Foucault 1851). Obwohl dieser Gegenstand in die Physik des Himmels gehört, möge er doch hier betrachtet werden, weil er eine lehrreiche Anwendung des Pendels und des Gesetzes der Trägheit ist. Wenn nämlich ein Pendel nach irgend einer Richtung in Schwingungen versetzt wird, und wenn keine Kraft vorhanden ist, welche die Richtung der Schwingungen zu ändern strebt, so muß das Pendel immer in derselben Richtung schwingen, seine Schwingungsebene muß constant bleiben. Man kann diese Folgerung aus dem Gesetze der Trägheit leicht mit dem Apparat (Fig. 65) nachweisen; derselbe wird mittels der Hülse a auf eine Schwungmaschine geschraubt und, nachdem man das Pendel in Bewegung gesetzt hat, mit beliebiger Schnelligkeit gedreht; ist dieselbe selbst so groß, daß man den Bügel gar nicht mehr sieht, so wird das Pendel doch noch immer mit unveränderter Bewegung nach einer und derselben Stelle des Zimmers hinschwingen. Doch muß hierbei die Aufhängung in b vollkommen frei sein; wäre dies nicht der Fall, so würde sich die Drehung des Bügels dem Pendel mittheilen. Ist aber die Aufhängung frei, d. i. der Faden leicht biegsam und die Verknüpfung möglichst einfach, und ist dabei das Pendel recht schwer und lang, so wird man den Versuch stundenlang fortsetzen können, das Pendel wird immer nach einer Richtung schwingen. Ganz dasselbe würde stattfinden, wenn wir das Pendel mit der Hülse a auf den Nordpol setzen könnten; es müßte immer nach derselben Stelle des Himmels hin schwingen, während unter ihm die Erde sich täglich 1 mal dreht; folglich müßte jeden Augenblick ein anderer Meridian unter die Richtung des Pendels treten. Da wir indeß

Componente ihres Gewichtes schützen, indem sie sich nach innen biegen; ein Glas Wasser kann, im Kreise geschwungen, eine umgekehrte Lage haben, ohne daß das Wasser ausläuft; in der Centrifugalrutschbahn ist man oft mit dem Kopfe unten, ohne herauszufallen. In allen diesen und vielen anderen Erscheinungen ist ein von der lebendigen Kraft erzeugter Druck oder Zug nach außen vorhanden, die Centrifugalkraft, welche nach dem fünften Axiom der Centripetalkraft gleich ist; folglich ist die Centrifugalkraft $F = mv^2 : r$ d. h. *die Centrifugalkraft ist direct proportional der Masse und dem Quadrat der Geschwindigkeit, aber umgekehrt proportional dem Krümmungsradius der Bahn* . . . . (23)

Man weist diesen wichtigen Satz mit der Schwungmaschine nach, in welcher eine Achse durch eine Räderübersetzung in rasch rotirende Bewegung versetzt wird; auf diese Achse schraubt man Gefäße, die unten schwerere Stoffe enthalten; beim raschen Drehen gehen dieselben nach oben oder nach außen (der Quecksilbergürtel). Ein aufgeschraubtes Gestell trägt auf einem Drahte 2 lose Kugeln, die durch eine Schnur verbunden sind; ist die eine Kugel doppelt so schwer wie die andere, aber dem Mittelpunkte zweimal näher als diese, so bleiben die Kugeln selbst bei der schnellsten Drehung stehen, womit die drei Theile des Satzes nachgewiesen sind. Man kann mit dieser Maschine auch die Richtigkeit der Formel selbst nachweisen; siehe A. 67. — Die Centrifugalkraft hat viele Anwendungen: der Centrifugalregulator an Dampfmaschinen, das Centrifugalpendel an Uhren, die Centrifugaltrockenmaschine, die Centrifuge in Zuckerfabriken, die Centrifugalpumpe, die Schleuder, der Lasso, die Centrifugalrutschbahn, der Ventilator u. s. w. In der Wissenschaft erklärt man die abgeplattete Gestalt der Erde (1719 gegen 1713 Meilen) und der anderen Planeten, sowie die Abnahme der Schwere von den Polen gegen den Aequator hin mittels der Centrifugalkraft. Der letztere Gegenstand wurde schon in 78. besprochen. Daß die Abplattung der Erde durch die Schwungkraft entstanden sein könne, sucht man durch eine aus losen Blechringen angefertigte Kugel nachzuweisen, die man auf der Schwungmaschine durch Rotiren leicht zum Abplatten bringen kann, sowie durch den Plateau'schen Versuch, eine in Flüssigkeit schwebende Oelkugel, die sich stark abplattet, wenn man sie mittels einer durchgesteckten Achse in Rotation versetzt. Neuere Geologen erklären die Abplattung durch die Wirkung von Polargletschern, weil sie den feurig flüssigen Urzustand der Erde nicht zugeben wollen; diese Erklärung geschieht jedoch ebenfalls durch die Centrifugalkraft, indem diese Geologen annehmen, daß das Weltmeer eine abgeplattete Kugel bilde. Die Centrifugalkraft gibt ein lehrreiches Beispiel über den engen Zusammenhang zwischen lebendiger Kraft und Druckkraft; denn die Centrifugalkraft ist ein Druck, der durch eine lebendige Kraft hervorgebracht wird. Sie zeigt aber auch, daß ein Druck für sich allein keine Bewegung hervorbringen kann; denn das von dem geschwungenen Faden sich losreißende Gewicht bewegt sich nicht in radialer Richtung, sondern in tangentialer Richtung weiter; die Centrifugalkraft ist also keine Arbeitskraft, sie ist in jedem Punkte der Bahn nur ein momentaner Druck, der in radialer Richtung keine Bewegung erzeugen kann. Daß bei den physikalischen Schwungmaschinen dennoch radiale Bewegungen entstehen, hat in den Rückwirkungen der dabei mitwirkenden festen Körper seinen Grund.

Man kann in die Formel (23) für die Centrifugalkraft statt der Geschwindigkeit v die Umlaufzeit t einführen. In dieser Zeit t durchläuft nämlich der Körper den Weg $2\pi r$, wenn seine Bahn kreisförmig ist; daher legt er in 1 Sec. den Weg $v = 2\pi r : t$ zurück. Setzen wir diesen Werth in Formel (23) statt v ein, so entsteht $F = 4\pi^2 rm : t^2$ . . . (24) Es liegt kein Widerspruch darin, daß nach dieser Formel die Schwungkraft dem Radius direct, nach (23) aber umgekehrt proportional ist; denn das erste findet nur statt, wenn die Geschwindigkeiten dieselben sind, und das letzte, wenn die Umlaufzeiten gleich bleiben.

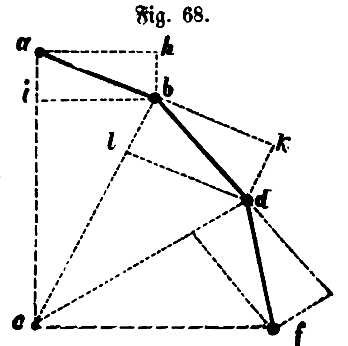
Da eine beschleunigende Kraft durch das Product ma aus Masse und Beschleunigung gemessen werden kann, so ist in der Formel $F = m(v^2 : r)$ der Factor $v^2 : r$ die durch die Centrifugalkraft erzeugte Beschleunigung, die sogenannte Centrifugalbeschleunigung; dies ergibt sich auch aus dem oben gefundenen Werthe derselben $a = gC : p$, wenn man statt C setzt $mv^2 : r$, es entsteht dann $a = gmv^2 : pr = v^2 : r$, weil $gm = p$ ist. Daß diese Centrifugalbeschleunigung nur nominell ist, bedarf nach dem Vorausgehenden keiner Begründung mehr.

142 **Gesetze der freien Centralbewegung** (Kepplers Gesetze 1610). Eine freie Centralbewegung ist eine solche, die ein frei im Weltraume schwebender Körper beschreibt, wenn er eine gewisse lebendige Kraft in sich trägt, und wenn er durch die Anziehung eines anderen Körpers stetig von der geraden Linie abgelenkt wird, die er der Trägheit gemäß durch seine lebendige Kraft beschreiben müßte. Die Tangentialkraft, d. i. die Kraft, mit welcher der Körper in der Richtung der Bahn-

tangente weiter zu gehen bestrebt ist, und die Centrifugalkraft eines Weltkörpers beruhen demnach in der lebendigen Kraft, die er durch eine uns noch unbekannte Ursache erhalten hat, und die er durch sich selbst weder vernichten, noch vermehren kann; die Centripetalkraft eines Weltkörpers beruht in der Anziehung eines oder mehrerer anderen Weltkörper.

Ein Weltkörper muß sich vermöge seiner lebendigen Kraft und der Anziehung anderer Weltkörper in krummer Linie um den Mittelpunkt der Anziehung bewegen. Man zeigt dies gewöhnlich auf folgende Weise: Wenn wir vorerst annehmen, daß die in c (Fig. 68) wirksame Centripetalkraft ruckweise wirke und den Weltkörper a in derselben Zeit durch den Weg ai zu ziehen vermöge, in welcher er durch seine Tangentialkraft den Weg ah zurücklegen würde, so muß nach dem Parallelogramm der Kräfte geschlossen werden, daß der Körper durch das Zusammenwirken der beiden Kräfte den Weg ab zurücklegen, also am Ende jener Zeit in b anlangen müßte. In gleicher Weise würde er nun den Weg bk = ab beschreiben; da er aber durch die Anziehung in derselben Zeit den Weg bl nach c hin durchlaufen muß, so wird er nach derselben Schlußweise wie vorhin, den Weg bd zurücklegen, und ebenso in einer gleichen Zeit den Weg df. Man sieht hieraus, daß der Körper sich zwar immer von dem Centralpunkte zu entfernen strebt, daß er aber durch dessen Anziehung daran gehindert wird und sich daher um denselben bewegen muß. Wenn die Anziehung nicht ruckweise, sondern stetig wirkt, so wird auch die Richtungsänderung nicht plötzlich, sondern stetig vor sich gehen, es wird also die Bahn nicht eine vieleckige sondern eine krumme Linie sein. Da die Anziehung der Weltkörper wirklich constant wirkt, so sind folglich die Bahnen der Weltkörper krumme Linien. — Dieses erste Gesetz haben wir erhalten, ohne über die beiden Kräfte Wirkungsgesetze vorauszusetzen. Die Wirkungsgesetze derselben sind uns indessen schon bekannt. Aus diesen Gesetzen kann man mittels der Analysis die Gestalt der Bahnen der Weltkörper berechnen. Da wir aber diese Wissenschaft hier nicht benutzen können, so soll nur das gesetzmäßige Resultat der Rechnung ausgeführt werden: Wenn die Anziehung nach Newtons Gravitationsgesetz auf einen durch seine lebendige Kraft fortgetriebenen Körper einwirkt, so ist dessen Bahn ein Kegelschnitt: eine Ellipse, eine Parabel oder eine Hyperbel. Mathematisch bewiesen wurde dieses Gesetz zuerst von Newton, aber aufgefunden wenigstens im Princip für die Planeten, wurde es schon von Keppler und lautet in Kepplers Form: Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. Es bildet in dieser Form das zweite der drei Keppler'schen Gesetze, welche die Grundlage der neueren Astronomie geworden sind; denn auch Newtons Gravitationsgesetz ergab sich erst aus diesen Gesetzen, während man jetzt umgekehrt Kepplers Gesetze aus jenem allgemeineren Grundgesetze ableitet. Nach dieser Ableitung ist also die Bahn jedes Weltkörpers eine der drei Kegelschnittlinien. Welche von diesen drei Linien aber ein Weltkörper beschreibt, hängt offenbar von dem Verhältnisse seiner lebendigen Kraft zu der centralen Anziehung ab. Wäre z. B die lebendige Kraft verschwindend klein gegen die Anziehung, so würde der Körper in gerader Linie in den Centralpunkt stürzen; wäre dagegen die Anziehung verschwindend klein gegen die

Fig. 68.



lebendige Kraft des Körpers, so würde sich derselbe in gerader Linie ins Unendliche von dem Centralpunkte fort bewegen. Wenn der Körper sich in kreisförmiger Bahn um den Centralpunkt bewegen sollte, wenn also die Centralkraft ma constant wäre, so müßte auch die derselben gleiche Centrifugalkraft $mv^2 : r$ constant sein; es müßte also immer $mv^2 : r = ma$ sein, oder $\frac{1}{2}mv^2$ müßte sein $= \frac{1}{2} . ma . r$; es findet also Kreisbewegung statt, wenn die lebendige Kraft gleich dem halben Product der Anziehung mit dem Abstande des Körpers vom Centralpunkte ist. Ebenso ergibt höhere Rechnung im einfachen Anschlusse an die letzte Bemerkung Folgendes: Wenn die lebendige Kraft des Weltkörpers in seinem kleinsten Abstande von dem Centralpunkte kleiner ist als das Product dieses Abstandes mit der Anziehung, so ist die Bahn des Weltkörpers eine Ellipse, von der die Kreisbewegung als specieller Fall erscheint. Ist die lebendige Kraft aber gleich dem Product des kleinsten Abstandes und der Anziehung, so ist die Bahn eine Parabel. Ist endlich die lebendige Kraft größer als jenes Product, so ist die Bahn eine Hyperbel.

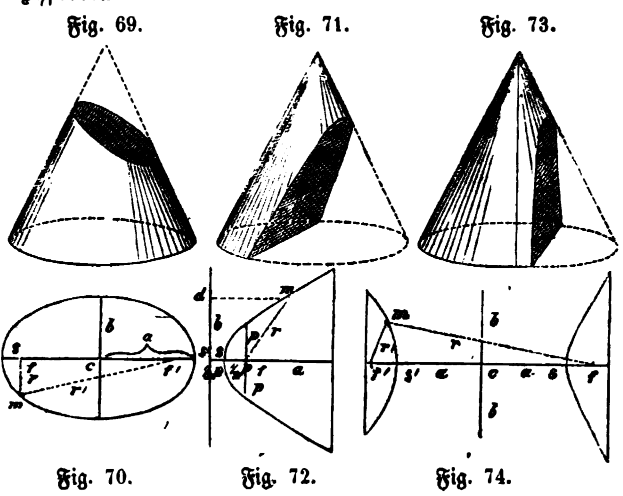


Fig. 69. Fig. 71. Fig. 73.

Fig. 70. Fig. 72. Fig. 74.

Entstehung und Zeichnung der drei Kegelschnitte.

Gebräuchliche Bezeichnungen.

Ellipse.

- a = halbe große Achse.
- b = halbe kleine Achse.
- f und f' = Brennpunkte.
- s und s' = Scheitel.
- c = Mittelpunkt.
- $cf' = cf = e = \sqrt{a^2 - b^2}$ = Excentricität der Ellipse.
- mf und mf' = r u. r' Leitstrahlen od. Radienvectoren.
- $r + r' = 2a$ Bildungsgesetz der Ellipse.
- sf = Perihelium (Perigäum).
- sf' = Aphelium (Apogäum).

Parabel.

- a = Hauptachse.
- b = Leitlinie od. Directrix.
- f = Brennpunkt.
- s = Scheitel.
- p = halber Parameter.
- $s's = \frac{1}{2}p$ dem Abstand des Scheitels von b.
- mf = Leitstrahl = r.
- md = Abstand von b.
- r = md Bildungsgesetz der Parabel.
- sf = Perihelium.
- Aphelium = unendlich.

Hyperbel.

- a = halbe reelle Achse.
- b = halbe imaginäre Achse.
- f u. f' = Brennpunkte.
- s u. s' = Scheitel.
- c = Mittelpunkt.
- $cf = cf' = \sqrt{a^2 + b^2} = e$.
- mf u. mf' = r u. r' = Leitstrahlen oder Radienvectoren.
- $r - r' = 2a$ Bildungsgesetz der Hyperbel.
- sf = Perihelium.
- Aphelium = unendlich.

144 Kreisbewegungen von Weltkörpern sind bis jetzt nicht aufgefunden worden; nur die zwei ersten Monde des Jupiter zeigen Bahnen, die sich für uns nicht merklich vom Kreise unterscheiden. Ueberhaupt sind die Bahnen der Nebenplaneten um die Hauptplaneten außerordentlich kreisähnlich, besitzen nur eine sehr geringe Excentricität; am meisten elliptisch ist noch die Bahn unseres Erdmondes, dessen Exc. = 0,05 der großen Achse beträgt;

folglich ist das Perigäum (die kleinste Entfernung des Mondes von der Erde) nicht viel von dem Apogäum (der größten Entfernung) verschieden. Auch die Bahnen der acht großen Planeten um die Sonne sind noch sehr kreisähnliche Ellipsen; so ist die Exc. der Erdbahn = 0,017; nur die Exc. des Mars = 0,09 und des Merkur = 0,2 erreichen einen größeren Betrag. Aus dieser elliptischen Bahnform folgt indessen, daß die Planeten nicht immer gleichweit von der Sonne entfernt sind; die kleinste Entfernung wird Perihelium, die größte Aphelium genannt. Für die Erde ist nach vorläufigen Ergebnissen des Venusdurchganges vom 8. Dez. 1874 das Perihel (1. Jan.) ca 19,7 M. M., das Aphel (2. Juli) 20,3 M. M.; also ist die Erde am 1. Jan. der Sonne um 600 000 M. näher, als am 2. Juli, wodurch uns die Sonne im Sommer kleiner als im Winter erscheint. — Etwas gestreckter sind die Bahnen der bis Ende 1876 aufgefundenen 169 Planetoiden; die Exc. derselben geht bis zu 0,3; diese Bahnen erscheinen uns schon deutlich als Ellipsen, wenn wir sie ganz klein auf ein Blatt Papier zeichnen, während Planetenbahnen in diesem Falle uns als Kreise erscheinen. Noch mehr elliptisch sind die Bahnen der Doppelsterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt; γ virginis, der Stern, welcher in der Jungfrau an der Spitze des v steht, hat die größte Excentrität der Bahn, = 0,88, wodurch die Form der Bahn noch weit gestreckter als ein Hühnerei ist. Ueber die Bahnen der Fixsterne oder Sonnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt (nach Mädler der Stern Alkyone in dem Sternbilde der Plejaden) ist noch nichts bekannt, als daß unsere Sonne sich in unseren Jahrtausenden gegen den Herkules zu bewegt. Am gestrecktesten erscheinen die Bahnen der Kometen; die Bahn des Encke'schen Kometen hat eine Exc. = 0,85, die des Halley'schen = 0,97; bei vielen Kometen geht die Exc. über 0,99; diese haben meist Umlaufzeiten von Tausenden von Jahren. Die Exc. mancher Kometenbahnen ist sogar = 1 und größer als 1, d. h. sie bewegen sich in Parabeln oder Hyperbeln; sie kommen aus dem unendlichen Weltraume, vielleicht von einem anderen Sonnensystem her, gehen um die Sonne und kehren auf der anderen Seite derselben wieder in das Unendliche zurück. — Nach den Berechnungen von Galle hatte das Meteor vom 30. Januar 1868 bei seinem Vorübergange an der Erde eine Geschwindigkeit von 7 Meilen, woraus sich ergibt, daß dasselbe sich in einer Hyperbel mit einer Exc. = 2,3 bewegte; so mögen wohl noch andere Sternschnuppen oder Meteore, wie auch Meteorschwärme in Hyperbeln oder Parabeln um die Sonne gehen. Dies wird insbesondere dadurch wahrscheinlich, daß Schiaparelli, Peters u. A. 1866 eine sehr nahe Uebereinstimmung zwischen den Bahnen von Kometen und von Sternschnuppenschwärmen gefunden haben. Demnach sind diese Kometen entweder ganze Meteorschwärme oder Theile von solchen; daher wird das über die Kometenbahnen Gesagte wohl auch für die Bahnen der Sternschnuppenschwärme und Sternschnuppen gelten. Und wirklich gibt es auch Schwärme, die in sehr gestreckten Ellipsen um die Sonne kreisen; so hat nach Leverrier der Novemberschwarm von 1866 eine Exc. = 0,9; andere Schwärme, wie der vom 13. August, sind im Laufe der Zeiten allmälig zu ganzen Ringen geworden, bilden also ausgefüllte Ellipsen um die Sonne.

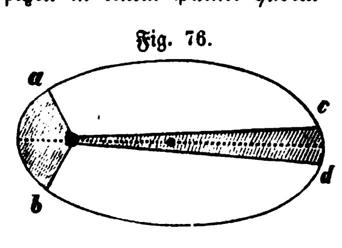
Durch das erste Keppler'sche Gesetz ist auch ausgesprochen, daß die Bahnen der Weltkörper Ebenen sind; denn die Kegelschnitte sind ja ebene Figuren; es ist daher nicht nöthig, dies als viertes Keppler'sches Gesetz besonders aufzustellen, wie es manchmal geschieht. Hieran schließt sich naturgemäß die Bemerkung, daß diese Ebenen nicht stark von einander abweichen, wenigstens bei den Hauptkörpern des Sonnensystems. Die acht großen Planeten, der Erdmond, die vier Jupitermonde bewegen sich in Bahnen, die nur wenig gegen die Erdbahn geneigt sind; stärker ist die Abweichung bei den 169 Planetoiden, bei den Ringen und dem berechneten Monde des Saturn, sowie bei den Kometen; doch laufen dieselben meistens noch so, wie sich die Sonne und die Planeten drehen, von Westen nach Osten, und scheinen hierdurch die Laplace'sche Weltbildungstheorie zu bestätigen. Dagegen die Uranusmonde haben sehr steil gegen die Erdbahn gestellte Bahnen, und von den Kometen sind viele sogar rückläufig, haben also Bahnwinkel von mehr als 90°; ebenso ist es mit Meteorschwärmen, z. B. mit dem Novemberschwarme. Nach Leverrier liegt hierin kein Widerspruch mit Laplace; denn diese Schwärme sind aus dem Weltraume in unser Sonnensystem gekommen und haben durch die Anziehung eines Planeten eine Umwandlung ihrer Bahn in eine Ellipse erfahren; Aehnliches wird wohl für die Kometen gelten.

145 2. **Die Radien vectoren beschreiben in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume.** — Beweis: Sei ab (Fig. 75) ein so kleiner Theil der Bahn eines Weltkörpers, daß wir denselben als gerade ansehen dürfen, so ist △ abc der von dem Radius vector ac während der Zeit dieser Bewegung beschriebene Flächenraum. In gleicher Zeit würde der Weltkörper danach den gleichen Weg bk = ab durchlaufen, wenn er nur seiner Trägheit folgen würde; durch Mit-

wirkung der Centripetalkraft aber gelangt er nach d; folglich beschreibt der Radius vector den Raum bdc. Es ist nun leicht zu zeigen, daß abc = bcd; denn △ abc = bkc, als Dreiecke, welche gleiche Grundlinien in einer und derselben Geraden und ihre Spitzen in einem Punkte haben. Ebenso ist auch △ bdc = △ bkc, weil sie dieselbe Grundlinie bc und ihre Spitzen in einer zur Grundlinie Parallelen kd haben. Folglich ist △ abc = △ bdc, womit das zweite Gesetz für kleine Flächenräume, sowie durch Summation solcher auch für größere bewiesen ist.

Fig. 75.

Fig. 76.



Dieses Gesetz, das erste der drei Keppler'schen Gesetze, macht es nicht blos möglich, die Stellung eines Planeten, Kometen u. s. w. für jede beliebige Zeit zu berechnen, wenn man einmal die Bahnelemente eines solchen Weltkörpers kennt, sondern es sagt uns auch sofort, daß ein sich im Kreise bewegender Körper immer dieselbe Geschwindigkeit hat, daß aber die Geschwindigkeit eines in elliptischer Bahn fortschreitenden Körpers eine verschiedene ist; und zwar ist für Planeten, Kometen, Sternschnuppen und Schwärme die Geschwindigkeit am größten im Perihel, am kleinsten im Aphel, und nimmt vom Aphel zum Perihel hin stetig zu. Denn im Perihel ist bei einer sehr gestreckten Ellipse der in einer gewissen Zeit beschriebene Flächenraum kurz, im Aphel aber lang; damit nun beide denselben Inhalt haben, muß der erstere breit, der letztere schmal sein, folglich muß der im Perihel in gewisser Zeit zurückgelegte Weg ab viel größer sein, als der im Aphel in derselben Zeit durchlaufene Weg cd (Fig. 76). Für Planeten kann der Unterschied nur ein geringer sein, weil sie nur kreisähnliche Ellipsen beschreiben; indessen ist der Unterschied doch groß genug, um die wahren Sonnentage merklich ungleich zu machen, bei uns im Winter länger als im Sommer. Für die Kometen ist der Unterschied groß, oft sehr bedeutend, wegen der lang gestreckten Formen ihrer Bahnen. Denn haben sie auch im Perihel eine noch so große Geschwindigkeit, ist aber das Aphel 10, 20, 30 . . . mal größer, so ist hier auch die Geschwindigkeit 10, 20, 30 . . . mal kleiner; dies ist der Grund, warum die Kometen überhaupt eine größere Umlaufzeit als die Planeten, manche aber gar Umlaufzeiten von Tausenden von Jahren haben. — Die kleine Geschwindigkeit im Aphel macht es erklärlich, daß ein Komet aus unendlicher Weite wieder in die Nähe der Sonne zurückkehrt; denn jene kleine Geschwindigkeit hat eine so kleine Tangentialkraft zur Folge, daß die Anziehung trotz der großen Entfernung überwiegend wird und den Kometen wieder herbeizieht; ebenso erklärt die große Geschwindigkeit im Perihel und die daraus resultirende überwiegende Tangentialkraft, daß der Komet trotz der großen Anziehung der so nahen Sonne nicht in dieselbe stürzt, sondern wieder ins Unendliche hinaus zieht. — Die durch Abnahme der Geschwindigkeit herbeigeführte Abnahme der lebendigen Kraft scheint dem Princip der Erhaltung der Kraft zu widersprechen; in Wirklichkeit ist sie aber diesem Princip gemäß. Denn indem sich der Weltkörper von dem Centralkörper entfernt, vollbringt er eine Arbeit, weil er die entgegenwirkende Anziehung überwindet; für diese Arbeit ist ein Verbrauch von lebendiger Kraft nöthig. Aber diese von dem Weltkörper aufgenommene Arbeit wird wieder in lebendige Kraft verwandelt, wenn er sich dem Centralkörper nähert, und zwar genau in den verbrauchten Betrag; denn im Perihel angelangt, hat der Körper wieder die vorige Geschwindigkeit und die vorige lebendige Kraft.

146 3. Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Cuben der großen Bahnachsen. — **Beweis:** Bezeichnen wir die Centripetalkräfte zweier Weltkörper mit k und k_1, ihre mittleren Entfernungen von dem Centralkörper (halbe große Bahnachsen) mit r und r_1, so ist nach Newtons Gravitationsgesetz $k : k_1 = r_1{}^2 : r^2$. Da die Centrifugalkräfte den Centripetalkräften gleich sein müssen, so haben wir nach Formel (24) auch $k : k_1 = r/t^2 : r_1/t_1{}^2$; hieraus folgt

$$\frac{r}{t^2} : \frac{r_1}{t_1{}^2} = r_1{}^2 : r^2 \quad \text{oder} \quad \frac{t^2}{r} : \frac{t_1{}^2}{r_1} = \frac{1}{r_1{}^2} : \frac{1}{r^2} \quad \text{oder} \quad \frac{t^2}{r} : \frac{t_1{}^2}{r_1} = r^2 : r_1{}^2$$

oder, wenn man beiderseits mit $r : r_1$ multiplicirt

$$t^2 : t_1{}^2 = r^3 : r_1{}^3 \text{ (q. e. d.)}$$

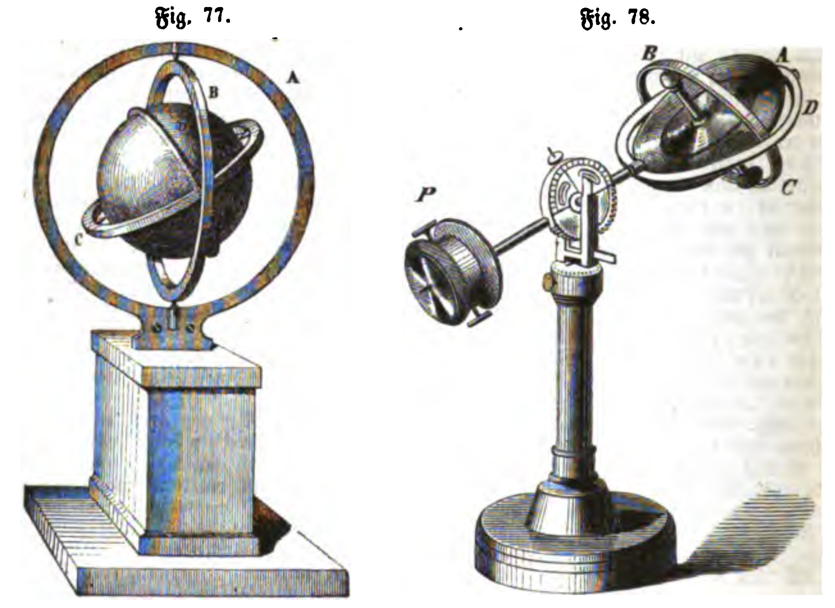
Während die zwei ersten Keppler'schen Gesetze sich nur auf einen Weltkörper beziehen, uns Aufschluß geben über die Bahnform und die Bewegungsart eines Weltkörpers für sich ohne Beziehung auf andere, zeigt uns das dritte Gesetz einen Zusammenhang zwischen den verschiedenen Weltkörpern, die zu einem und demselben Centralkörper gehören; wir sind im Stande, mittels dieses Gesetzes die Entfernung und dadurch die Bahn und die Geschwindigkeit eines Planeten zu berechnen, wenn wir nur seine Umlaufzeit kennen, welche ja leicht am Himmel zu beobachten ist, und wenn uns diese beiden Elemente von irgend einem anderen Planeten bekannt sind. Der Jupiter z. B. hat eine Umlaufzeit von 11 Jahren; folglich verhalten sich die Quadrate der Umlaufzeiten von Erde und Jupiter wie 1 : 121; ebenso verhalten sich auch die Cuben der ganzen und halben Bahnachsen; folglich verhalten sich die halben Bahnachsen selbst wie 1 : 5; d. h. der Jupiter ist 5mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde. Da nun die Planetenbahnen nahezu Kreise sind, so ist die Jupiterbahn 5mal länger als die Erdbahn; für diese 5mal längere Bahn braucht der Jupiter eine 11mal längere Zeit, sonach ist seine Geschwindigkeit $^{11}/_5$, nahezu 2 mal kleiner als die der Erde, = 2 Meilen. — Unter der Voraussetzung, daß die Planetenbahnen Kreise seien, läßt sich aus dem dritten Gesetze ein allgemeiner Satz über die Geschwindigkeiten der Planeten ableiten. Diese Geschwindigkeiten sind $v = 2\pi r : t$ und $v_1 = 2\pi r_1 : t_1$ daher $v : v_1 = r/t : r_1/t_1$. Erhebt man diese Gleichung zum Quadrat und verbindet sie mit der obigen, die das dritte Keppler'sche Gesetz ausspricht, so erhält man $v^2 : v_1{}^2 = r_1 : r$, woraus $v : v_1 = \sqrt{r_1} : \sqrt{r}$, d. h. die Geschwindigkeiten zweier Planeten verhalten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln der mittleren Abstände von der Sonne. Der Saturn z. B. ist mehr als 9mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde; daher ist seine Geschwindigkeit mehr als 3mal kleiner wie die der Erde, = 1,3 Meilen ca.

147 **Aufg.** 208. Die Erde hat eine Geschwindigkeit von 4,1 M., wie groß müßte ihre Geschwindigkeit sein, damit ihre Bahn a) eine Parabel, b) ein Kreis würde? Anb.: Für den ersten Fall muß nach 142. sein $^1/_2 mv^2 = ma . r$, worin a die von der Sonne auf die Erde ausgeübte Acceleration bedeutet; auf der Sonne selbst ist die Acceleration 9,808. 28,36^m. Die Erde ist vom Mittelpunkte der Sonne 20000000 : 95000 = 210mal weiter entfernt als ein Punkt der Sonnenoberfläche; folglich ist a = 9,808. 28 : 210² = 0,006. Daher ist v^2 = 2. 20000000. 0,006 : 7500 = 30,8, woraus v = 5,6 Meilen. Ebenso ergibt sich für den Kreis v = 3,9 M. (20000000 M. ist die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde). — A. 209. Die kleinste Entfernung des Merkur ist 6000000 M., die mittlere 7500000 M.; wie groß müßte seine Perihelgeschw. sein, damit er a) eine Parabel, b) einen Kreis beschriebe? Aufl. a) v = 8,4 M.; b) v = 5,9 M. — A. 210. Das Aphelium des Encke'schen Kometen = 40 Mill. M.; das Perihelium = 3 Mill. M.; wie groß ist die Geschwindigkeit im Aphel, wenn die im Perihel = 12 Meilen beträgt? Aufl.: 0,9 M. — A. 211. Im Aphel der Erde erscheint die Sonne mit einem Durchm. von 1890 Sec., im Perihel mit 1960 S.; wie groß ist die stündliche Bewegung im Winter, wenn sie im Sommer 148 Sec. beträgt? Aufl.: 153″. — A. 212. Die Entfernung des Merkur ist 8 Mill., die des Saturn 200 Mill. Meilen; wie groß ist die Geschw. des Saturn, wenn die des Merkur = 6,6 M. ist? Aufl.: 1,3 M. — A. 213. Die Umlaufzeiten von Neptun und Merkur sind 60117 und 88 Tage; wie weit ist der erstere von der Sonne entfernt? Aufl.: 78. 8 = 624 Mill. M. — A. 214. Wenn die Entfernung des Jupiter und des Saturn von der Sonne 104 und 190 Mill. M. betragen und die Umlaufzeit des ersteren 12 Jahre ist, wie groß ist die des letzteren? Aufl.: 12. 2,47 = 29,64 Jahre. — A. 215. Die von der Sonne auf die Erde ausgeübte Acceleration aus der Centrifugalkraft zu finden. Anb.: Da die Centrifugalkraft eben durch diese Beschleunigung gemessen wird, so ist dieselbe $c^2 : r = 4^2$: 20000000 Meilen = 0,006^m. — A. 216. Die Masse der Sonne zu finden. Anb.: Die von der Sonne auf die Erde ausgeübte Acceleration ist 0,006^m, die von der Erde auf die Sonne = 9,808 : (20000000 : 860)² = 0,0000000175. Die Massen müssen sich nun wie die Accelerationen verhalten (nach Formel 8); folglich Sonnenmasse : Erdmasse = 0,006 . 0,0000000175, woraus die Sonnenmasse = 340000 Erdmassen.

148 **Freie Achsen. Präcession. Nutation.** Eine freie Achse ist eine solche, welche durch keine Kraft, keine mechanische Einrichtung in ihrer Richtung festgehalten wird, welche sich also nach jeder Richtung bewegen kann. Eine freie Achse findet sich z. B. in einem tanzenden Toppich oder Brummkreisel, in einem Scheibenkreisel wie etwa an einem tanzenden Knopfe, an einem tanzenden oder rollenden Geldstücke,

an einem frei dahin rollenden Rade; freie Achsen sind die Drehachsen aller Weltkörper. Nachgeahmt ist die freie Achse eines Weltkörpers in Bohnenbergers Maschinchen, Fig 77. In dem festen Ringe A kann sich der Ring B um eine vertikale Achse und in diesem der Ring C um eine horizontale Achse drehen, so daß die Drehachse der in dem Ringe C drehbaren Kugel jede beliebige Richtung annehmen kann. Auch in dem Fessel'schen Rotationsapparate (Fig. 78) ist die Achse

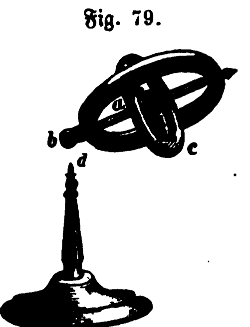
Fig. 77. Fig. 78.



der Scheibe A eine freie, ebenso wie in der Schiffslampe die Achse der Lampe und in dem Universalgelenke oder dem Hook'schen Schlüssel die Achse der einen nicht im Lager liegenden Welle. Für die freien Achsen gelten folgende Gesetze: Gehört die freie Achse einem ruhenden Körper an, so kann sie durch die kleinste Kraft aus ihrer Richtung gebracht werden. Ist sie aber die Drehachse eines rotirenden Körpers, so verharrt sie mit einer Kraft in ihrer Richtung, welche mit der Masse und der Geschwindigkeit des sich drehenden Körpers wächst. Der erste Theil des Satzes ergibt sich sofort aus der Definition der freien Achse. Für den zweiten Theil muß zuerst gezeigt werden, daß durch die Drehung die Achse nicht unfrei wird. Zwar zieht jedes Molekül des Körpers dadurch an der Achse, daß es eine Centrifugalkraft hat; allein in einem regelmäßig um die Achse geformten Körper von gleichartiger Masse wird jeder Zug nach einer Seite hin durch einen gleichen und entgegengesetzten Zug aufgehoben, den ein in gleicher Lage jenseits der Achse befindliches Molekül ausübt. Demnach wird in einem regelmäßigen Körper durch die Drehung kein Druck auf die Achse erzeugt; dieselbe bleibt frei. Aber gerade so, wie jedes Molekül, vermöge der Trägheit in seiner Richtung zu verharren strebt, gerade so muß auch jedes Molekül vermöge der Trägheit in seiner Drehungsebene verharren und demnach einen Widerstand ausüben, wenn eine Kraft es aus seiner Ebene heraus zu bewegen strebt. Dies ist aber der Fall, wenn man die Achse aus ihrer Richtung bringen will; alle Moleküle setzen dann einen Widerstand entgegen, der folglich um so größer ist, je mehr Moleküle vorhanden sind, je größer also die Masse des Körpers ist, und je schneller sich die Moleküle bewegen.

149 Ruhende, auf der Spitze stehende Kreisel aller Art fallen sofort um, weil sie in labiler Ruhe sind; ein tanzender Kreisel fällt nicht, selbst nicht, wenn er schief steht. Ruhende Scheiben, wie Räder, Geldstücke und Reifen ꝛc. fallen leicht um, wenn sie auf der Peripherie stehen, fallen aber nicht, wenn und so lange sie auf der Peripherie rollen oder tanzen. Bringt man die Kugel an Bohnenbergers Maschinchen durch eine um ihre Achse geschlungene Schnur in rasche Drehung, so kann man das Maschinchen wenden, drehen und stürzen, wie man will, man kann es auf der Scheibe einer Schwungmaschine in rascheste Bewegung setzen, die Achse bleibt immer der ersten Lage parallel. So bleiben auch die Achsen der Weltkörper immer in ihrer Richtung, wenn der Körper noch so schnell und mannichfaltig durch den Weltraum fortläuft; so zeigt unsere Erdachse immer gegen den bekannten Nordpolarstern und erhält dadurch den Wechsel der Jahreszeiten in alter Weise constant. Besonders auffallend zeigt sich der Widerstand gegen jede Aenderung der Achsendrehung an dem Maschinchen, sowie an Fessels Rotationsapparat (Fig. 78), an welchem eine ganze Reihe interessanter Versuche gemacht werden kann, und an einer einfachen Abänderung desselben, an Foucaults Gyroskop (γῦρος = Kreis) (Fig. 79). Wenn an dem zweiten Apparat die Scheibe A in rasche Drehung versetzt worden ist, so kann man das Gegengewicht P sogar wegnehmen, ohne daß der ganze schwere Theil ABCD sich senkt. Hat man die Scheibe c des letzteren Apparates in Rotation versetzt, so kann man die ganze Einrichtung mittels des Pfännchens b auf die Spitze d setzen, ohne daß sie sinkt. Hier ist also wegen der großen Masse und wegen der großen Geschwindigkeit der Hauptmasse in dem Ringe das Beharrungsvermögen so groß, daß die verticale Componente desselben das Gewicht der ganzen Einrichtung im Gleichgewichte hält, ja bei rascher Drehung sogar etwas nach aufwärts dreht. In ähnlicher Weise stellt sich ein schief stehender Kreisel von selbst wieder senkrecht auf, wenn er nur rasch genug rotirt. Versucht man es, an den drei Apparaten mit der Hand die Achse zu verändern, so spürt man sofort einen merklichen Widerstand, ein zurückstoßendes Widerstreben der Maschine.

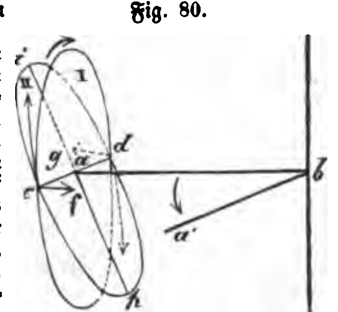
Fig. 79.



150 2. **Wenn auf einen um einen freie Achse sich drehenden Körper eine nicht allzu große Kraft einwirkt, welche die Richtung der Achse zu ändern strebt, so ändert sich die Richtung der Achse nicht, sondern die Achse dreht sich mit unveränderter Richtung in einer Kegeloberfläche um die Hauptachse des ganzen Systems; und zwar dreht sich die Achse in entgegengesetzter Richtung wie der Körper, wenn sie durch die Kraft von der Hauptachse entfernt wird; die Geschwindigkeit der Kegeldrehung der freien Achse ist um so kleiner, je schneller die Drehung des Körpers und je kleiner die ablenkende Kraft ist.**

Beweis nach Poggendorff. Wir führen denselben am einfachsten an dem Gyroskop. Es sei I (Fig. 80) die mit der Achse ab drehbare Scheibe, welche durch eine Kraft in die Lage II gebracht werde. Die Theilchen der Scheibe z. B. c und d haben das Bestreben, in der früheren Richtung weiter zu gehen, werden demnach von Kräften in den durch Pfeile angedeuteten Richtungen gezogen. Die Kraft bei c wirkt diesseits, die Kraft bei d jenseits der neuen Lage der Scheibe schief gegen dieselbe; diese Kräfte enthalten daher jedenfalls senkrechte Componenten cf und dg, welche an der Scheibe von entgegengesetzten Seiten ziehend wirken, und sie daher um den Durchmesser ih zu drehen streben. Dadurch erhält die Scheibe eine in der Figur nicht gezeichnete Lage, durch welche die jetzt sichtbare Seite allmälig verschwindet und die Hinterseite sichtbar wird, sie rückt also aus der vorigen Lage gegen den Beschauer hin und mit ihr kommt die Achse in die Lage ba′, hat sich also entgegengesetzt wie ursprünglich die Scheibe gedreht.

Fig. 80.



Bei dem Gyroskop wird die drehend wirkende Veränderung der Lage in jedem Augenblicke durch das sehr bedeutende Gewicht des ganzen seitlich hängenden Apparates erzielt; die Geschwindigkeit der Drehung muß daher auch sehr bedeutend und dadurch besonders auffallend sein. An dem Fessel'schen Apparat kann man durch Verschieben des Gegen-

gewichtes P das Uebergewicht bald auf die eine, bald auf die andere Seite bringen und daher die Drehung wechseln, vermehren oder vermindern, oder auch ganz aufheben. Am interessantesten ist in dieser Beziehung Bohnenbergers Maschinchen, weil es die Kegeldrehung der Erdachse nachahmt. An dem innersten Ringe sind zwei kleine Löcher zur Aufnahme eines kleinen Uebergewichtchens, das die ruhende Achse sofort senkrecht stellt, die rotirende aber zur langsamen Kegeldrehung bringt. In ähnlicher Weise würde sich die ruhende Erdachse, welche mit der Ebene der Erdbahn oder Ekliptik einen Winkel von 66° bildet, auf dieselbe senkrecht stellen. Denn vermöge der Abplattung der Erde hat dieselbe am Aequator einen größeren Radius als gegen die Pole hin, kann also als eine Kugel betrachtet werden, die um den Aequator herum noch einen Wulst trägt, der nach den Polen zu immer dünner wird. Dieser Wulst nun befindet sich nicht in der Ebene der Ekliptik, sondern ist um 23° gegen dieselbe geneigt, wird aber von der in der Ekliptik stehenden Sonne angezogen. Durch diese Anziehung müßte er sich der Ekliptik nähern, bis er endlich in dieselbe fiele, und so müßte sich die Erdachse auf die Ekliptik senkrecht stellen, sie müßte der Achse der Ekliptik parallel werden, — wenn eben die Erde sich nicht drehen würde. Da dieses aber der Fall ist, so gilt für die Erdachse der zweite Theil unseres zweiten Satzes, die Erdachse muß sich mit unveränderter Richtung in einer Kegeloberfläche um die Achse der Ekliptik drehen. Zwar beträgt die Zeit für eine solche Kegeldrehung der Erdachse 26 000 Jahre (das sog. Platonische Jahr); es zeigt daher die Erdachse Jahrhunderte lang nach einem Punkte des Himmels, unser Polarstern wird noch lange Zeit als solcher gelten können; allein in Jahrtausenden zeigt doch die Erdachse allmälig nach anderen Stellen des Himmels, welche indeß alle gleichweit von dem Ende der Achse der Ekliptik d. i. von dem Pole der Ekliptik, welcher im Sternbilde des Drachens liegt, entfernt sind. Der Nordpol des Himmels beschreibt also in 26 000 Jahren einen Kreis von 23° Halbmesser um den Pol der Ekliptik, er wird sich z. B. in 12 000 J. in dem Sterne Wega (α Lyrae), einem Sterne erster Größe, befinden. Hierdurch verändern sich im Laufe der Zeit manche Erscheinungen. Der große Bär, die Kallisto, die sich zur Zeit der alten Griechen nicht in den reinen Schooß des Okeanos tauchen durfte, geht jetzt theilweise unter; das herrliche Sternbild des südlichen Kreuzes mag wohl den alten Aegyptern sichtbar gewesen sein, wie Dante uns ahnen läßt, wenn er singt:

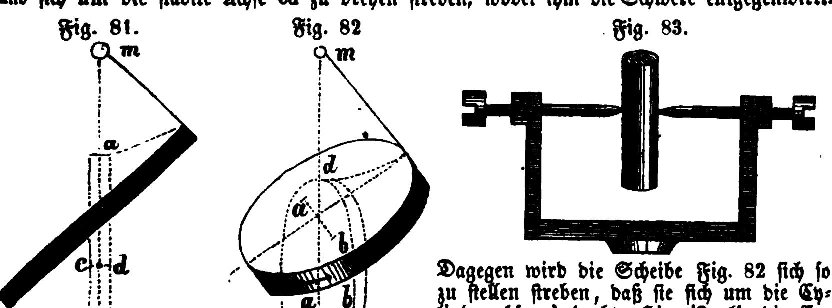
Jo mi volsi a man destra, e posi mente
All' altro polo, e vidi quattro stelle
Non viste mai fuorché alla prima gente. (Purgatorio, cant. I. v. 22).

Aus der Veränderung der Polstellung folgt übrigens keine Veränderung der Jahreszeiten; denn die Erdachse verändert ihre Richtung gegen die Ekliptik nicht, und daher behält auch der Aequator seine Richtung gegen dieselbe, von welcher ja der Wechsel der Jahreszeiten abhängt, vollkommen bei. Allein eine Veränderung der Stellung des Aequators gegen die Ekliptik findet wohl statt. So wie die Erdachse sich in 26 000 Jahren in umgekehrter Richtung wie die Erde selbst, also von Osten nach Westen, um die Achse der Ekliptik dreht, so muß sich auch der Aequator in derselben Zeit drehen; folglich müssen die zwei Schnittpunkte von Aequator und Ekliptik, der Frühlingspunkt und der Herbstpunkt, die zwei Nachtgleichenpunkte, nach Westen rücken; und zwar beträgt die Verrückung oder Präcession der Nachtgleichen jährlich 50″, so daß hierdurch die Länge der Sterne, da sie von dem Frühlingspunkte an gerechnet wird, jährlich um 50″ zunimmt, eine Thatsache, die schon von Hipparch (130 v. Chr.) beobachtet wurde. Der Frühlingspunkt, der zu jener Zeit im Widder lag, befindet sich jetzt fast auf der Grenze zwischen dem Wassermann und den Fischen; die Kalenderangaben über die Stellung der Sonne und der Planeten, die noch nach alter Weise erfolgen, sind daher falsch, und die Benennungen der Sternbilder des Thierkreises, die meist mit Jahreserscheinungen zusammenhängen, passen jetzt nicht mehr. Ebenso müssen ältere Sternmessungen, wenn man sie mit heutigen vergleichen will, um den Betrag der seitdem stattgehabten Präcession corrigirt werden, insbesondere die Länge, die Rectascension und die Declination. Auch gelten die Sternkarten immer nur für einige Jahrhunderte. Umgekehrt können alte Angaben über die Stellung der Sterne zur Bestimmung der Zeit dieser Angabe dienen. (Der Thierkreis von Denderah).

Die Präcession rührt nicht blos von der Sonne, sondern auch von dem Monde und den Planeten her; die beiden letzten Einflüsse aber sind veränderlich und daher auch die Präcession. Ein besonderer Einfluß des Mondes besteht darin, daß innerhalb 19 Jahren die Präcession einmal rascher und einmal langsamer als im Mittel stattfindet, und daß in den Zwischenzeiten der Pol sich einmal dem Pole der Ekliptik mehr nähert, und das anderemal sich mehr entfernt, als oben angegeben wurde. Demnach bleibt der Pol nicht auf dem Kreise von 23° Halbmesser, sondern beschreibt auf demselben alle 19 Jahre eine kleine Ellipse, deren halbe große Achse = 9″ ist. Diese Erscheinung nennt man das

Wanken oder die **Nutation** der Erdachse. Sie beruht in dem 19jährigen Umlaufe der Mondknoten (Knotenmonat oder draconitischer Monat). Weil nämlich die Mondbahn nicht mit der Erdbahn zusammenfällt, so sucht die in letzterer Ebene stehende Sonne den Mond in diese Ebene hereinzuziehen, so daß er bei jedem Umlaufe eher in dieselbe kommt, als es nach dem Schnitte der beiden Bahnen stattfinden sollte. Dieser Schnittpunkt oder Knoten ist also dem Monde entgegen, von Osten nach Westen gegangen, und kommt in 19 Jahren wieder an die frühere Stelle. Folglich muß die von dem Monde herrührende Kegeldrehung der Erdachse veränderlich sein je nach der Stellung der Knoten, wodurch sich die 19jährige Aenderung in der Präcession, d. i. die Nutation erklärt.

151 **Unfreie Achsen, stabile, labile und indifferente Achsen.** Nicht jede Drehachse, wenn sie auch der mechanischen Einrichtung nach in keine Lage gezwungen ist, ist bei der Drehung frei; die analytische Mechanik zeigt, daß eine Drehachse während der Drehung nur dann frei ist, wenn sie durch den Schwerpunkt des Körpers geht, und wenn in Bezug auf dieselbe das Trägheitsmoment entweder ein Maximum oder ein Minimum ist; jede andere Drehachse ist unfrei, mag sie auch die freieste Lagerung oder Aufhängung haben; sie erfährt durch die Centrifugalkräfte einen Druck oder Zug, muß sich also drehen oder fortbewegen. Aber auch diejenigen Schwerpunktachsen, welche der genannten Bedingung genügen, zeigen bei der Drehung ein verschiedenes Verhalten, je nachdem das Trägheitsmoment ein Maximum oder ein Minimum ist. Für den letzteren Fall ist nämlich auch die Centrifugalkraft aller Körpertheilchen zusammen ein Minimum; daher muß dieselbe größer werden, sowie die Achse nur die kleinste Veränderung erleidet und dadurch unfrei wird; durch die Centrifugalkraft erleidet sie dann einen Druck, und wird dadurch immer mehr aus ihrer Lage gebracht, bis sie endlich in diejenige Lage gelangt, wo die Centrifugalkraft ein Maximum ist; gewöhnlich ist dann hier auch das Trägheitsmoment ein Maximum, die Achse ist wieder frei und muß bei jeder Veränderung wieder in diese Lage zurückkehren. In dieser Lage ist also die freie Achse stabil, hier gehorcht sie den angeführten zwei Gesetzen. In der vorigen Lage dagegen war sie labil frei, wobei sie dem zweiten Gesetze nicht folgen kann. — Es hängt von der Körperform ab, ob eine Drehachse stabil oder labil frei ist; für die Kugel sind alle Durchmesser stabil freie Achsen. Nach Reuleaux, welcher 1858 diese Erscheinungen näher untersucht hat, ist in einem Cylinder die geometrische Achse nur dann stabil, wenn die Höhe kleiner ist als $\frac{1}{2}\sqrt{3}$ oder 0,866 ... multiplicirt mit dem Radius; ist die Höhe größer als dieser Theil des Radius, so ist jene Achse labil; stabil ist dann eine derjenigen Schwerpunktachsen, welche auf der Cylinderachse senkrecht stehen. Hieraus erklären sich die Erscheinungen Fig. 81 und 82. Die beiden Cylinder sind mit Fäden an dem Punkte m aufgehängt, der in der Achsenrichtung einer Schwungmaschine liegt. Wird dieselbe rasch gedreht, so wird der Cylinder Fig. 81 bald die labile Drehachse ab verlassen und sich um die stabile Achse cd zu drehen streben, wobei ihm die Schwere entgegenwirkt.



Dagegen wird die Scheibe Fig. 82 sich so zu stellen streben, daß sie sich um die Cylinderachse ab dreht. Hier ist also die Cylinderachse stabil, während sie in Fig. 81 labil ist. Zwischen diesen beiden Cylinderformen muß offenbar eine Form liegen, in welcher die geometrische Achse weder labil, noch stabil, sondern indifferent ist, welche Achse also weder mit Kraft in einer Lage verharrt, noch aus einer angenommenen Lage leicht herausweicht, sondern in jeder Lage ruhig bleibt. Dieses findet statt, wenn das Trägheitsmoment in Bezug auf die geometrische Achse ebenso groß ist, als in Bezug auf die zu derselben senkrechten Schwerpunktachsen d. i., wenn (nach Reuleaux) die Höhe gleich 0,866 von dem Radius ist. Aehnliches ergibt sich für andere Körper. Diese interessanten Erscheinungen lassen sich am besten darstellen mittels einer auf die Schwungmaschine geschraubten Gabel, Fig. 83, deren Arme zur Herstellung der freien Achse verschraubbare Stifte tragen, zwischen deren Spitzen die Körper mit kleinen Pfännchen gefaßt werden.

Zweite Abtheilung.

Die Mechanik der flüssigen Körper oder die Hydromechanik.

(Hydrostatik und Hydraulik.)

1. Grundeigenschaften der Flüssigkeiten.

152 Flüssig ist ein Körper, wenn seine Theilchen zwar noch einen Zusammenhang haben, aber durch die kleinste Kraft gegen einander verschoben werden können. Dies ist nach 53. der Fall, wenn die lebendige Kraft der Moleküle so groß ist, daß die schwingende Bewegung derselben in jedem Augenblicke in eine fortschreitende übergeht. Je mehr von den Molekülen in fortschreitender Bewegung begriffen sind, desto leichtflüssiger ist der Körper; leichtflüssig sind condensirte Gase, Aether, Alkohol, ätherische und Steinöle, besonders Gasolin und Rhigolin, Schwefelkohlenstoff, Anilin, Wasser; zähflüssig die fetten Oele, Schwefelsäure, Glycerin, Syrup; schwerflüssig sind Quecksilber und andere flüssige Metalle. Aus der Definition der Flüssigkeiten ergeben sich folgende Grundeigenschaften:

a. Die Flüssigkeiten haben selbständiges Volumen; denn ihre Theilchen besitzen Zusammenhang; sie haben aber, wenn sie nicht unabhängig von der Erde und anderen Körpern sind, keine selbständige Gestalt, weil sowohl die Erde als auch andere nahen Körper die leicht beweglichen Theilchen aus ihrer Lage ziehen können.

b. Die Flüssigkeiten nehmen die Formen ihrer Gefäße an, weil jede höhere Schicht durch ihr Gewicht auf die tieferen drückt und daher die Theilchen in jeden, etwa leer gedachten, Raum hineinschieben muß.

c. Die höchste Oberfläche der Flüssigkeiten ist wagrecht. Wäre sie nicht wagrecht, so könnte man sich unter den obersten Theilchen schiefe Ebenen denken, auf denen dieselben alsdann herabrollen müßten; dies kann so lange geschehen, bis keine schiefe Ebene mehr denkbar, bis also die Oberfläche wagrecht ist, d. h. auf der Richtung nach dem Mittelpunkte der Erde senkrecht steht.

d. Die wagrechte Oberfläche der Flüssigkeiten ist ein Theil einer sehr großen Kugelfläche. Wäre die ganze Erde mit Wasser bedeckt, so müßte jedes Element der Oberfläche auf der Richtung nach dem Mittelpunkte senkrecht stehen; diejenige Fläche aber, deren Elemente sämmtlich auf den Richtungen nach einem Punkte senkrecht stehen, ist die Kugelfläche; das Meer hat also eine Kugeloberfläche; an Seen, in Gefäßen u. s. w. ist wegen der Kleinheit der Oberfläche im Verhältnisse zur Größe der Kugel die Krümmung unmerklich.

e. Unabhängige Flüssigkeiten haben Kugelgestalt. Bestände die Erde ganz aus Wasser, so müßte sie nach d. ebenfalls eine Kugel sein. Diese Folgerung müßte auch für kleinere Körper gelten, wenn sie frei und flüssig im Weltraume schwebten; sie wären Tropfen im Weltraume. Für sehr kleine Mengen von Flüssigkeiten auf der Erde ist die Schwere so gering, daß sie die gegenseitige Anziehung der Theilchen nicht überwinden kann; dieselben sind also auch gleichsam von der Schwere unabhängig und nehmen daher Kugelgestalt an; dies erklärt die Gestalt der Tropfen; doch wirkt hierbei die Oberflächenspannung mit, welche, wie wir später sehen werden, nur bei der Kugelfläche ringsum gleich groß ist. Besonders interessant ist in dieser Beziehung der Plateau'sche Versuch (1843): In eine Mischung von Weingeist und Wasser, welche dasselbe specifische Gewicht wie Oel besitzt, bringt man mit einer Pipette eine geringere oder größere Quantität Oel; das Gewicht derselben wird von der leichtflüssigen und daher nachgebenden Mischung getragen und aufgehoben, weil diese einen gleichen Gegendruck ausübt; die Oelmasse wird dadurch unabhängig von der Schwere und nimmt daher Kugelgestalt an. Man kann mit dieser Kugel die Abplattung der Erde und das Kant-Laplace'sche Weltbildungssystem veranschaulichen, indem man durch die Kugel eine Achse steckt und diese rotiren läßt. Die Kugel rotirt dann ebenfalls, plattet sich ab, nimmt Ringform an und löst sich in kreisende Kugeln auf.

f. Die Flüssigkeiten haben keine Poren im gewöhnlichen Sinne; denn befänden sich größere Lücken in dem Gewebe der Moleküle, so würden die leicht beweglichen Theilchen in diese Lücken hineinfließen und dieselben erfüllen. Molekulare Zwischenräume besitzen die Flüssigkeiten wie alle anderen Körper, sogar durchschnittlich größere als die festen Körper. Da nun die Gasmoleküle und theilweise auch die Moleküle der Flüssigkeiten in fortschreitender Bewegung begriffen sind, so müssen dieselben, wenn sie in Berührung mit einer Flüs-

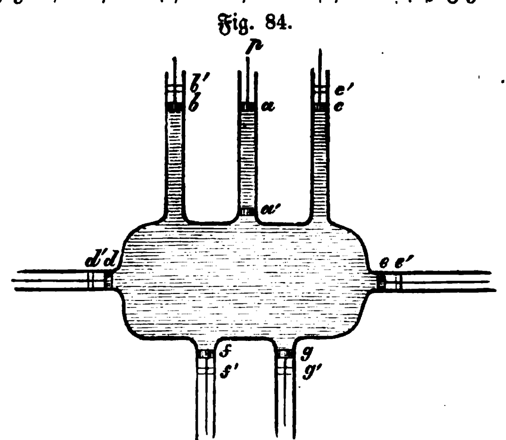
sigkeit stehen, zwischen die Moleküle derselben eindringen oder diffundiren und so sich in derselben auflösen, wenn die materielle Verschiedenheit dies gestattet.

g. Die Flüssigkeiten sind nur wenig compressibel, weil sie nicht wie die festen Körper Poren haben, und weil ihre Moleküle nicht wie bei den Luftarten sehr weit von einander abstehen. Näheres s. 53. Hört eine zusammendrückende Kraft zu wirken auf, so kehren die Moleküle vermöge ihrer Bewegung in die frühere Lage zurück, der Körper dehnt sich also wieder aus: Flüssigkeiten sind ausdauernd elastisch.

Die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes (Pascal 1650). Wird auf eine Flüssigkeit an irgend einer Stelle ein Druck ausgeübt, so pflanzt sich dieser Druck in unmeßbar kurzer Zeit durch die ganze flüssige Masse bis an die Grenzen der Flüssigkeit und zurück fort, so daß jede gleich große Fläche im Inneren wie an der Grenze einen gleich großen Druck erleidet, welches die Richtung der Fläche auch sein möge. An der Grenze wird ein Gegendruck von der Grenzwand ausgeübt; ist dieselbe keines Gegendruckes fähig oder ist derselbe kleiner als der ausgeübte Druck, so muß an der betreffenden Stelle die Flüssigkeit mit ihrem Ueberdrucke vordringen. **153**

Diese wichtigste Grundeigenschaft der Flüssigkeiten wird am besten durch einen ideellen Versuch klar: Das mit sieben ganz gleichen cylindrischen Röhren versehene Gefäß Fig. 84 sei mit Wasser gefüllt, das durch gewichtlose Kolben abgeschlossen sei. Wird nun auf den Kolben a ein Druck p ausgeübt und dieser Kolben dadurch bis a′ verschoben, so ist die Arbeit p . aa′ consumirt worden. Weil die Flüssigkeit nicht zusammendrückbar ist, so muß sie dem Drucke p ausweichen. Sie kann dies, indem sie in die übrigen 6 Röhren eindringt, und da die Flüssigkeit nach allen Seiten gleich leicht beweglich ist, so wird dies auch geschehen; die flüssige Masse aa′ wird sich auf die 6 Röhren vertheilen; es werden daher die 6 Kolben, jeder um $^1/_6$ aa′, nach außen geschoben. Damit aber dem Princip von der Erhaltung der Kraft gemäß die an diesen 6 Kolben producirte Arbeit der bei aa′ consumirten gleich sei, muß jeder Kolben mit dem Drucke p verschoben werden; denn nur dann sind die 6 Arbeiten zusammen = p . aa′, wenn jede = p . $^1/_6$ aa′, wenn also der zu dem Wege $^1/_6$ aa′ gehörige Druck gleich p ist. Es wird also jeder gleiche Kolben mit dem gleichen Drucke p verschoben. Diese gleiche Fortpflanzung des Druckes nach der Grenze ist aber nur möglich, wenn auch im Inneren derselbe Druck herrscht. Das Gesetz gilt nicht blos für bewegte Flüssigkeit, sondern auch für ruhende; die eben ausgeführte Ableitung wird einfach dadurch auf eine ruhende Flüssigkeit ausgedehnt, daß man die Wege unendlich klein setzt.

Fig. 84.

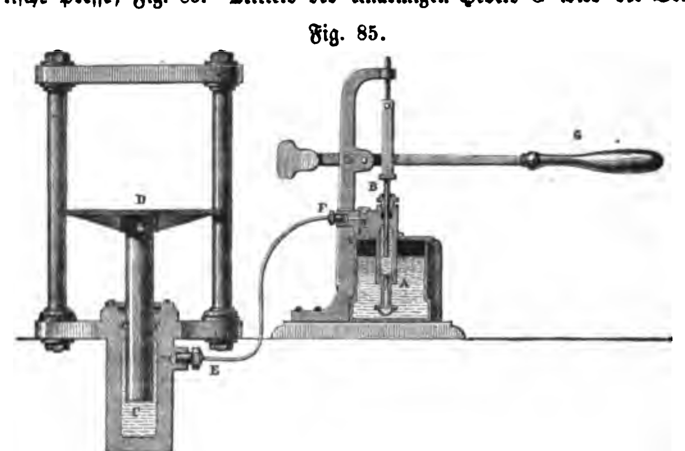


Durch diesen ideellen Versuch ist das Bestehen des Gesetzes zwar bewiesen, aber nicht erklärt. Dies kann auf folgende Weise geschehen: Durch einen Druck auf eine Flüssigkeit werden die gedrückten Moleküle ein wenig vorangeschoben, d. h. sie erfahren eine Vermehrung ihrer fortschreitenden Bewegung und dadurch eine Verstärkung ihrer lebendigen Kraft. Demnach müssen diese Moleküle auf die folgenden stärker stoßend einwirken und so auch deren lebendige Kraft erhöhen. Weil nun aber die fortschreitende Bewegung der Moleküle jeden Augenblick nach allen Richtungen stattfindet, so muß auch nach allen Seiten die lebendige Kraft der Theilchen erhöht, also der Druck nach allen Seiten fortgepflanzt werden. In einer von festen Grenzwänden umschlossenen Flüssigkeit muß er auch nach rückwärts gleich groß sein; denn in diesem Falle können die Moleküle der Grenzwand keine Arbeit mittheilen, kehren also mit derselben lebendigen Kraft um, so daß in jedem Punkte der Druck von allen Seiten gleich groß wird. Ist aber eine Stelle der Grenzwand beweglich, so empfängt sie Arbeit; die Moleküle kehren daher nicht mit derselben lebendigen Kraft um, der Druck nach rückwärts ist dann im Inneren kleiner als der nach vorwärts, die flüssige Masse muß sich voran bewegen nach der beweglichen Grenzwand, nach dem Kolben hin.

Das Gesetz der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes kommt fast in allen Lehren über die Flüssigkeiten und die Luftarten zur Verwendung. Dasselbe zeigt sich besonders auffallend in folgenden Erscheinungen: Ein mit Wasser gefülltes Glas zerbricht, wenn man in dem Wasser eine Glasthräne zerspringen läßt. — Das Fischprellen besteht darin, daß man mit einem Hammer auf das Eis schlägt, unter welchem im Wasser ein Fisch schwimmt, oder daß man einen stark explosiven Stoff im Wasser entzündet. — Der kartesianische Taucher, eine im Wasser schwimmende hohle Gestalt mit einer Oeffnung an der Seite, sinkt hinab, wenn auf das Wasser ein Druck ausgeübt wird, weil durch diesen Druck das Wasser in die Figur dringt und diese dadurch schwerer macht.

Eine besonders wichtige Anwendung hat die gleichmäßige Fortpflanzung des Druckes in der hydraulischen Presse (Bramah 1797). Wenn nämlich der mittels eines Kolbens ausgeübte Druck sich auf jede gleich große Fläche in derselben Größe fortpflanzt, so muß eine n mal so große Fläche einen n fachen Druck erfahren; man kann demnach einen auf Wasser ausgeübten Druck beliebig vervielfachen, indem man einfach das Wasser auf eine beliebig große, fortschiebbare Fläche einwirken läßt; nur ist dem bekannten Princip gemäß die Bewegung dieser Fläche viel kleiner als die des Kolbens. Hierauf beruht die hydraulische Presse, Fig. 85. Mittels des einarmigen Hebels G wird der Druckkolben B einer kleinen Pumpe auf- und abbewegt und dadurch Wasser in die kleine Pumpe gesogen und durch das Rohr FE in das Reservoir C getrieben. Der hierbei von dem Druckkolben B ausgeübte Druck pflanzt sich auf den Preßkolben in C fort, wird aber dort soviel mal größer als die Unterfläche dieses Kolbens größer ist als diejenige des Druckkolbens B.

Fig. 85.



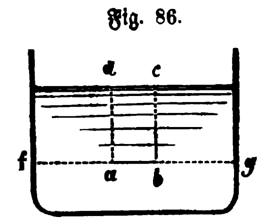
Ist z. B. wie bei der großen hydraulischen Presse, die an der großen Röhrenbrücke über den Menai-Kanal nach der Insel Anglesea zum Heben der einzelnen Röhrenstücke benutzt wurde, der Durchmesser des Druckkolbens = 1″ engl. und der des Preßkolbens = 20″, so übt der letztere einen 400mal so großen Druck als der erstere aus; durch den Hebel G kann diese Vergrößerung z. B. 10 bis 20mal vervielfacht werden. So kann ein Mann, der eine Druckkraft von 50kg besitzt, wohl eine Pressung von 400 000kg ausüben; an jener Brücke wurden Stücke von über 1 Million kg Gewicht gehoben. Auch benützt man die hydraulische Presse zum Auspressen in Oelmühlen, Rübenzuckerfabriken, Stearinfabriken, zum Glätten von Papier und Zeug, zum Zusammenpressen von Baumwolle, Heu u. s. w., zur Prüfung der Festigkeit von Tauen, Ketten, Platten u. s. w., zum Krümmen der Schiffpanzerplatten, zum Einpressen von Luft in große Räume z. B. in den Mont-Cenis-Tunnel, zum Einkeilen der Räder auf ihre Wellen u. s. w.

154 Aufg. 217. Wie groß ist der Druck auf einen Kreis von 45cm Durchmesser, auf ein Rechteck von 20cm Höhe und 12cm Breite, auf eine Ellipse von 15cm großer und 8cm kleiner Achse, auf ein Trapez von 25cm Höhe und parallelen Seiten von 40 und 30cm, wenn der Druck auf 1qcm = 24g beträgt? Aufl.: 38,17kg, 5,76kg, 2,262kg, 21kg. — A. 218. In einer Presse ist der Durchmesser des Druckkolbens 1,5cm, der des Preßkolbens 15cm, ein Mann drückt an einem Hebel oon 2m Länge, der die Stange in 15cm Entfernung vom Stützpunkte trägt, mit 40kg; wie groß ist der Druck des Preßkolbens? Aufl.: 60681kg. — A. 219. Wie groß mußte an der Menai-Brücke der Nutzeffect der Dampfmaschine sein, wenn die Kolbenstange derselben direct auf den Druckkolben wirkte, und wenn ein Stück von 1 Mill. kg in jeder Secunde 9m gehoben werden sollte? Aufl.: 33 1/3e. — A. 220. Wenn ein Mann von 30kg Druckkraft mit einem Hebel von 10facher Uebersetzung und einem Druckkolben von 2cm Durchmesser einen Druck von 20 000kg ausüben soll, welchen Durchmesser muß dann der Preßkolben haben? Aufl.: 16,3cm.

2. Das Princip der gleichmäßigen Druckfortpflanzung in Verbindung mit dem Gewichte der Flüssigkeiten.

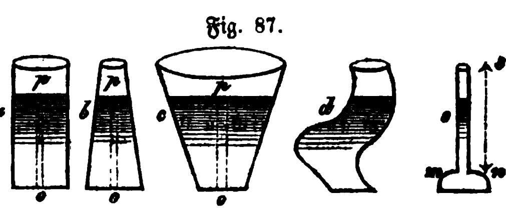
155 **Druck durch das Gewicht der Flüssigkeiten.** Auf einem beliebigen, wagrechten Flächenelement ab (Fig. 86) im Inneren einer Flüssigkeit ruht der flüssige Körper abcd: das Flächenelement hat das Gewicht dieser Säule zu tragen, erleidet also denselben Druck, als ob ein Kolben mit einer Kraft, jenem Gewichte gleich, auf dasselbe gesetzt wäre. Da nun ein solcher Druck nach dem rubricirten Princip sich nach allen Richtungen in gleicher Stärke auf jedes gleiche Flächenelement fortpflanzt, so finden folgende Pressungen statt: 1. Jedes gleiche Flächenelement derselben wagrechten Ebene fg erleidet einen Druck von oben nach unten, der nur von der Größe des Elementes und seiner senkrechten Entfernung vom Spiegel abhängt; die Größe dieses Druckes ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitsäule, deren Grundfläche das Flächenelement und deren Höhe der Abstand desselben vom Spiegel ist. Es ist hierbei einerlei, ob die Wände des Gefäßes senkrecht oder schief nach auswärts, schief nach einwärts, nach oben oder unten eingebogen, oder von jeder beliebigen Form sind; wo das Element die betreffende flüssige Säule nicht über sich hat, rührt der Druck von anderen Elementen derselben wagrechten Ebene her. Jedes Element einer höher gelegenen wagrechten Ebene erleidet einen *kleineren* Druck, jedes niedriger gelegene Element einen größeren Druck. 2. Dieser Druck auf die Flächenelemente findet nicht blos von oben nach unten, sondern auch in jeder beliebigen Richtung innerhalb der wagrechten Ebene statt; jedes Flüssigkeitstheilchen erleidet von allen Seiten genau denselben Druck und ist daher im Gleichgewichte; auch die Wände erfahren denselben und erwiedern ihn, wenn ihre Festigkeit es gestattet. 3. Derselbe Druck pflanzt sich auch auf den Boden und von diesem zurück aufwärts fort; es findet also auf das Flächenelement ab genau derselbe Druck von unten nach oben, wie von oben nach unten statt, wodurch diese Druckkräfte einander aufheben und daher die Ruhe von ab nicht stören. Deßhalb aber kann der abwärts gerichtete Druck nicht auch auf tiefere Elemente wirken, diese erfahren von oben und von unten den größeren Druck, der ihrer Flüssigkeitsäule entspricht; er kann sich auch nicht auf höhere Elemente übertragen, diese erleiden nur den Druck von unten, der von dem Säulchen auf ihrer wagrechten Ebene herrührt. Dieser Druck von unten nach oben findet auch statt, wenn über dem Element ab die Flüssigkeit weggenommen wäre; er rührt alsdann von den seitlichen Elementen derselben wagrechten Ebene her. Er findet auch statt, wenn an die Stelle der Flüssigkeit abcd ein anderer Körper gesetzt würde; ja er ist erst dann recht merklich, weil dann der Druck von oben nach unten ein anderer sein kann, und hierdurch die Aufhebung des Druckes nach oben durch den nach unten wegfallen kann.

Fig. 86.



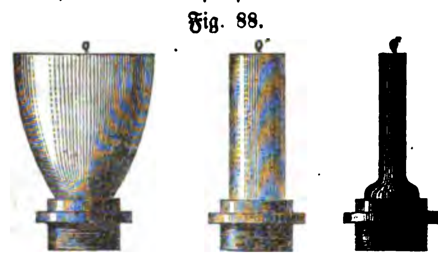
156 **Der Bodendruck.** Das **hydrostatische Paradoxon.** Unter dem Bodendrucke versteht man den Druck, den der Boden eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäßes durch dieselbe erfährt. Ueber die Größe desselben besteht folgendes Gesetz: **Der Bodendruck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitsäule, deren Grundfläche der Boden und deren Höhe der Abstand des Bodens**

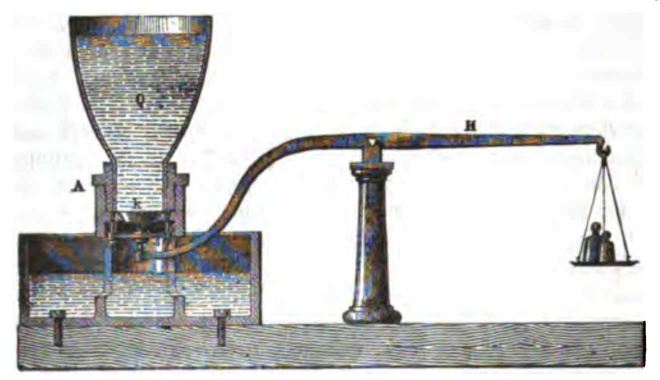
Fig. 87.



vom Spiegel ist. Denn es erfährt irgend ein Flächenelement o (Fig. 87) der tiefsten Schicht, das noch senkrecht unter dem Spiegel ist, den Druck des über ihm stehenden Säulchens op; dieser Druck aber pflanzt sich nach 155. in gleicher Größe auf jedes gleiche Flächenelement der tiefsten Schicht fort; es hat also jedes gleiche Flächenelement den Druck eines solchen Säulchens zu tragen, mag dieses über dem Element wirklich vorhanden sein oder nicht, wie es z. B. in b, d und e der Fall ist. Der Druck auf die unterste Schicht geht nun direct auf den Boden über; daher hat der Boden den Druck aller dieser Säulchen auszuhalten, d. i. das Gewicht einer Säule, deren Grundfläche der Boden und deren Höhe dessen Abstand vom Spiegel ist.

Fig. 88.



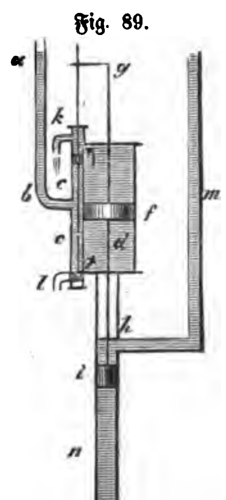


Der Bodendruck ist also unabhängig von der Form des Gefäßes und von der Flüssigkeitsmenge; alle Gefäße von gleichem Boden und gleich hohem Spiegel haben denselben Bodendruck, obwohl vielleicht in dem Gefäße c zwanzig mal soviel Flüssigkeit enthalten ist als in e. Dies erscheint dem gewöhnlichen Sinne unglaublich; daher heißt das angeführte Gesetz das hydrostatische Paradoxon. Besonders unglaublich erscheint es, daß der Boden, wie in b und e einen viel größeren Druck erleiden soll, als das Gewicht der Flüssigkeit beträgt. Daher ist hier der experimentelle Nachweis besonders wichtig. Man benutzt dazu am besten Haldats Apparat, Fig. 88. Welches Gefäß auch bei A aufgeschraubt werde, immer ist dasselbe Gewicht nöthig, um das Ventil k, das den Bodendruck zu tragen hat, zu heben und dadurch das Wasser zum Abfließen zu bringen. Wenn nun nach solchen Versuchen die Wahrheit des obigen Gesetzes nicht mehr bezweifelt werden kann, so erscheint es doch unerklärlich, daß der Bodendruck nicht in allen Fällen mit seiner gesetzmäßigen Größe wirkt. Setzt man sich z. B. das Gefäß e auf den Kopf oder auf die Wage, so verspüren beide nur die Wirkung des Gewichtes, nicht aber des Bodendruckes. Dies erklärt sich daraus, daß bei m und n ein Druck nach oben herrscht, der einer Flüssigkeitsäule von der Höhe ns entspricht, aber nicht durch eine wirklich vorhandene, nach unten drückende Säule ns aufgehoben wird. Dieser Druck nach oben pflanzt sich durch die Wände auf den Boden fort, so daß die Unterfläche des Bodens nur mit dem wirklich vorhandenen Gewichte nach unten drückt, während die Oberfläche den gesetzmäßigen Druck tragen muß. Ebenso erklärt sich auch, daß in c auf die Wage ein größerer Druck als der Bodendruck wirkt.

Der Bodendruck wird angewandt: zur Ausziehung von Extractivstoffen aus Pflanzen durch Reals Extractivpresse, ein weites die Pflanzen enthaltendes Gefäß, das oben eine hohe, enge, mit Wasser gefüllte Röhre trägt und daher einen Druck erfährt, als ob das Gefäß mit seiner ganzen Weite bis auf dieselbe Höhe ginge und mit Wasser gefüllt wäre; sodann im anatomischen Heber, eine hohe, unten umgebogene, in ein weites Gefäß mündende Röhre, durch deren Wasserdruck eine über das Gefäß gespannte Haut so ausgedehnt wird, daß man die anatomische Beschaffenheit derselben erkennen kann. Auf dem Boden tiefer Meere ist der Druck so groß, daß leere und hermetisch geschlossene Gefäße dort zerdrückt oder angefüllt werden, daß versunkene Fahrzeuge verderben, weil das Holz durch den Druck zu dicht und schwer geworden ist, daß Thiere aus höheren Meeresschichten zu Grunde gehen, wenn sie rasch in große Tiefen gelangen, wie Versuche mit der hydraulischen Presse beweisen.

Der Druck, den eine Wassersäule ausübt, wird auch zum Betriebe einer Kraftmaschine, der sogenannten **Wassersäulenmaschine** benutzt, welche von Reichenbach erfunden wurde und insbesondere zur Beförderung großer Wassermassen angewandt wird. So heben die Wassersäulenmaschinen von Reichenhall die Soole über 300′ hoch und befördern sie 30 Stunden weit fort zu den Siedepfannen. Von der Wirkung dieser Maschine kann uns Fig. 89, welche eine doppelt wirkende Wassersäulenmaschine mit Kolbensteuerung zum Pumpenbetriebe vorstellt, eine Idee geben. Das Treibwasser kommt durch die Säule ab in die Steuerkammer c, *in welcher* die Steuerkolben so stehen, daß das Treibwasser in den Treibcylinder d unter den Treibkolben f gelangt und durch seinen Druck diesen Kolben und damit die Kolbenstange gh hebt, wodurch *auch* der Pumpenkolben i gehoben wird. Das frühere Treibwasser über dem Kolben f kann durch das Abfallrohr k abfließen. Ist der Treibkolben oben angelangt, so hat in demselben Augenblicke ein Arm g an der Kolbenstange die Steuerkolben so gehoben, daß das Treibwasser jetzt über den Treibkolben gelangt, wodurch dieser sinkt, während das vorige Treibwasser durch das Abfallrohr *l* fortfließt. So erzeugt das Wasser der Säule ab eine hin- und hergehende Bewegung der Stange gh und hierdurch des Pumpenkolbens i, wodurch das Wasser n in das Rohr m gehoben wird.

Fig. 89.



Das Gesetz über den Bodendruck gilt auch für jede Stelle innerhalb der Flüssigkeit; nur ist die Grundfläche der Säule hier die gedrückte Stelle.

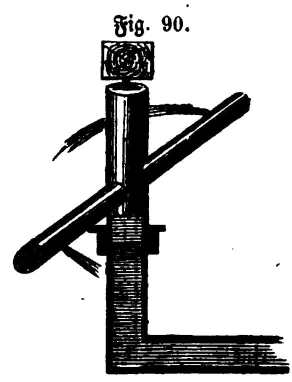
157 Aufg. 221. Wie groß ist der Bodendruck in dem mit Wasser gefüllten Gefäße c, wenn die Grundfläche 6cm Durchmesser hat und die Höhe 20cm beträgt: Aufl.: 565,5g. — A. 222. Eine Reals Presse habe ein cubisches Gefäß von 30cm Kante und eine Röhre von 30m Höhe; wie groß ist der Bodendruck? Aufl.: 2700kg. — A. 223. Wie groß ist in einem Quecksilbergefäße der Druck auf ein gleichseitiges Dreieck von 8cm Seite, welches 10cm unter dem Spiegel liegt? Aufl.: $\frac{1}{4} \cdot 8^2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 13{,}6 = 3764$g. — A. 224. Welchen Druck hat ein Mann von 120qdm Oberfläche in einer Taucherglocke oder in einem Skaphander zu ertragen, wenn er 30m tief eingetaucht ist? Aufl.: 36 000kg. — A. 225. In einem anatomischen Heber soll der Druck auf 1qcm 1kg betragen; wie hoch muß die Röhre über der Haut mit Wasser gefüllt sein? Aufl.: 10m.

158 **Der Seitendruck.** Der Seitendruck ist derjenige Druck, den eine Flüssigkeit durch ihr Gewicht auf die Seitenwände des Gefäßes ausübt. Für denselben gilt folgendes Gesetz: Der Seitendruck ist gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitsäule, deren Grundfläche die gedrückte Stelle und deren Höhe die Entfernung des Schwerpunktes derselben vom Spiegel ist. Beweis: Wir denken uns die gedrückte Fläche durch wagrechte Linien in unendlich schmale Streifen s, s′, s″ u. s. w. zerlegt, deren Abstände von dem Spiegel = a, a′, a″ u. s. w. seien. Dann sind nach 155. die Pressungen auf diese Streifen = ias, ia′s′, ia″s″ u. s. w., wo i das Gewicht der Cubikeinheit der Flüssigkeit ist. Der Druck auf die ganze Fläche f ist demnach $= i(as + a's' + a''s'' + \ldots)$ Dieser Klammerausdruck ist aber die Summe der statischen Momente der einzelnen Flächentheile in Bezug auf den Spiegel, welche Summe nach dem Bestimmungssatze des Schwerpunktes (s. 118.) gleich dem Moment der ganzen Fläche d. i. gleich dem Producte der ganzen Fläche f mit dem Abstande h des Schwerpunktes von dem Spiegel sein muß. Folglich ist $i(as + a's' + a''s'' + \ldots) = ifh$ (q. e. d.)

Will man den Seitendruck als Kraft in Rechnung ziehen, so müßte man den Angriffspunkt dieser Kraft, den Mittelpunkt des Druckes kennen. Dieser fällt nicht mit dem Schwerpunkte zusammen, weil die parallelen Druckkräfte auf die verschieden tiefen Theile der gedrückten Fläche nicht einander gleich sind, sondern er liegt tiefer als der Schwerpunkt; er muß durch eigene Rechnung bestimmt werden. Bei der Anlage von Schleußen und Dämmen muß man den Seitendruck berücksichtigen. In einem gefüllten Gefäße wird der Seitendruck auf die eine Wand durch den gleichen Druck auf die andere Wand aufgehoben. Erhält aber die eine Wand eine Oeffnung, so wird die gedrückte Fläche, folglich

auch der Seitendruck auf dieselbe kleiner; daher wird der Druck auf die entgegengesetzte Wand jetzt nicht mehr vollständig aufgehoben und der Ueberschuß kann bewegend wirken. Wird demnach ein Gefäß an einer Schnur aufgehängt, so neigt es sich nach der dem Ausflusse entgegengesetzten Seite. Wird ein Gefäß drehbar aufgestellt und trägt es Arme, welche seitliche Ausflußöffnungen haben, so muß es sich ebenfalls nach entgegengesetzter Richtung drehen. Man nennt diese Wirkung die Reaction des ausfließenden Wassers; auf derselben beruht das Segner'sche Wasserrad, welches directe Anwendung gefunden hat zu dem Reactionsrad von Althans in Vallendar (Fig. 90), dessen Einrichtung durch die Figur deutlich ist. In dieser Kraftmaschine geht ein großer Theil der in dem Wasser vorhandenen lebendigen Kraft verloren, weil das Wasser mit großer Geschwindigkeit aus derselben fließt. Whitelaw brachte daher Sförmig gekrümmte Ausflußröhren an, durch welche das Wasser allmälig ausfließt und deßhalb seine Geschwindigkeit mehr an dieselben abgibt. Man nennt diese Kraftmaschine die schottische oder Reactionsturbine. Das Bestreben, das Princip des Segner'schen Wasserrades zu Kraftmaschinen zu benutzen, hat zu der Erfindung der horizontalen Wasserräder oder Turbinen geführt; doch beruhen dieselben nicht auf der Reaction, sondern auf der lebendigen Kraft herunter fließenden Wassers, gehören daher nicht hierher.

Fig. 90.



159 Aufg. 226. Wie groß ist der Seitendruck auf eine rechteckige, 20^{cm} breite Wand, an welcher Wasser 50^{cm} hoch steht? Aufl.: 25^{kg} — A. 227. Wie groß ist der Seitendruck von Quecksilber auf ein gleichseitiges Dreieck von 10^{cm} Seite, wenn die obere Seite dem Spiegel parallel und 6^{cm} von demselben entfernt ist? Aufl.: $\frac{1}{4} . 10^2 . \sqrt{3} . (\frac{1}{6} . 10 \sqrt{3} + 6)$ $13,6 = 5,235^{kg}$ — A. 228. Wie groß ist der gesammte Seitendruck auf ein cylindrisches Gefäß von 12^{cm} Durchmesser, das bis zu 15^{cm} Höhe mit Wasser gefüllt ist? Aufl.: $4241,6^{g}$. — A. 229. Ein Faß, aus Dauben von 1^{m} Höhe und 20^{cm} Breite bestehend, trägt oben ein 10^{m} hohes Rohr, und ist, sammt diesem, mit Wasser gefüllt; es platzt durch den Seitendruck auf die Dauben; welchen Druck erfuhr eine solche? Aufl.: 2100^{kg} A. 230. An einem 6^{m} langen Schleußenthore steht das Wasser einerseits $2,4^{m}$, andererseits 1^{m} hoch; wie dick muß dasselbe bei 10facher Sicherheit sein, wenn die abs. Festigkeit des Holzes (nach Tabelle 75) = 9 ist? Aufl.: Ueberdruck von der höheren Seite $= 14280^{kg}$ daher nach 71. die Gleichung $14280 . 10 = \frac{4}{3} . fbh^2 : l = \frac{4}{3} . 9 . 2400 . h^2 : 6000$, woraus $h = 172^{mm}$.

160 **Communicirende Röhren.** Unter communicirenden Röhren versteht man solche aufrechte Gefäße, welche unten mit einander in Verbindung stehen. Für dieselben gilt folgendes Gesetz: *In communicirenden Röhren steht eine und dieselbe Flüssigkeit gleich hoch; die Höhen verschiedener Flüssigkeiten verhalten sich umgekehrt wie die specifischen Gewichte derselben.* Der erste Theil ergibt sich einfach aus der Lehre vom Seitendrucke; an einer beliebigen Stelle des Verbindungsrohres kann nur dann Gleichgewicht stattfinden, wenn der Seitendruck von beiden Seiten her gleich groß ist; da nun die Stelle nach beiden Seiten gleich groß und die Flüssigkeit beiderseits gleich schwer ist, so kann diese Gleichheit des Seitendruckes nur stattfinden, wenn der Abstand vom Spiegel beiderseits derselbe ist. — Für verschiedene Flüssigkeiten wird der Druck von der einen Seite her in dem Maße größer, als die Flüssigkeit schwerer ist wie die der anderen Seite; damit der Druck ebenso groß werde wie von der anderen Seite, muß folglich die Flüssigkeitsäule in demselben Maße niedriger werden.

Das Gesetz der communicirenden Röhren hat Anwendung zu den Standmessern oder *Wasserstandszeigern*, d. i. Glasröhren, welche mit einem gefüllten Gefäße wie Dampfkesseln u. drgl. in Verbindung stehen und dadurch die Höhe der Flüssigkeit anzeigen; sodann zu der Kanal- oder *Wasserwage*, die aus zwei verbundenen mit Wasser gefüllten Glasröhren besteht, und welche dazu dient, den Höhenunterschied verschiedener Punkte eines Terrains zu bestimmen; (zu genaueren Untersuchungen benutzt man die *Nivellirwage*, bestehend aus Fernrohr und Libelle); endlich zu den *Wasserleitungen* in Röhren oder geschlossenen Kanälen, mittels deren man Wasser von einer Stelle zu jeder beliebigen anderen, nicht höher gelegenen Stelle führen kann. Jenes Gesetz erklärt uns auch das

Steigen und Fallen des Horizontal- oder Grundwassers, des Wassers in Teichen, Sümpfen, Lachen u. s. w., die sich in der Nähe von Flüssen befinden, die Entstehung der Quellen und der artesischen Brunnen. (Näheres in d. Physik d. Erde.)

Der Druck von unten nach oben oder der Auftrieb (Archimedes bei Hiero 220 v. Chr.). Der Druck von unten nach oben ist an jeder Stelle gerade so groß wie der Druck von oben nach unten, also ebenfalls gleich einer Flüssigkeitsäule, deren Grundfläche die gedrückte Stelle und deren Höhe der Abstand derselben vom Spiegel ist. Derselbe rührt ebensowohl von der Flüssigkeit oberhalb dieser Stelle her, als von der Flüssigkeit über der ganzen durch jene Stelle gedachten wagrechten Ebene. Er ist also auch vorhanden, wenn über der gedrückten Stelle die Flüssigkeit weggenommen und durch einen anderen festen, flüssigen oder luftförmigen Körper ersetzt wird. Gerade dann ist der Druck von unten nach oben oder der Auftrieb am besten merkbar, und kann man ihn demgemäß experimentell nachweisen. Hat man eine weite Glasröhre, gegen deren untere Oeffnung man mittels einer Schnur eine Platte anziehen kann, so daß dieselbe einen Boden bildet, so fällt dieser Boden ab, wenn man die Schnur losläßt; senkt man die Röhre aber mit dem festgezogenen Boden in Wasser, so kann man die Schnur loslassen, ohne daß der Boden abfällt, weil er durch den Druck von unten nach oben an die Röhrenmündung gepreßt wird. Gießt man nun Wasser in die Röhre, so fällt der Boden ab, sowie das Wasser bis zur Höhe des äußeren Spiegels gestiegen ist; hiermit ist auch die Größe des Auftriebes nachgewiesen.. 161

Aus der Größe des Auftriebes folgt ein wichtiges Gesetz, das Archimedische Princip: Jeder Körper verliert in Flüssigkeit so viel von seinem Gewichte, als die verdrängte Flüssigkeit wiegt. Bringen wir einen Körper in Flüssigkeit, so wirkt an seiner Unterfläche als Abtrieb das Gewicht des Körpers und das der Flüssigkeit über demselben; als Auftrieb aber wirkt auf dieselbe das Gewicht der über dieser Unterfläche denkbaren flüssigen Säule. Demnach wirkt die Flüssigkeit oberhalb des Körpers nach unten und nach oben und kann so außer Betracht bleiben. Nach unten wirkt dann noch das Gewicht des Körpers, nach oben das Gewicht der flüssigen Säule, die an seiner Stelle denkbar ist, d. i. das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit. Dieses Gewicht wirkt also dem Gewichte des Körpers direct entgegen, d. h. es hebt von diesem Gewichte einen solchen Theil auf, der dem Gewichte der verdrängten Flüssigkeit gleich ist.

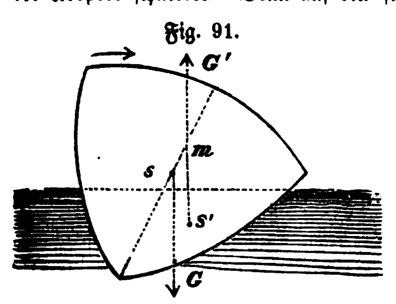
Dieses wichtige Gesetz kann man einfach nachweisen mittels der hydrostatischen Wage, d. i. einer gewöhnlichen Wage, deren eine Schale sehr kurz aufgehängt ist und unten einen Haken trägt. An diesen Haken hängt man ein cylindrisches oder vierkantiges Blechgefäß, das inwendig einen ganz genau anschließenden Metallkörper trägt. Wird die Wage balancirt, sodann der Metallkörper aus dem Gefäße genommen, an einen Haken unter dem Boden des Gefäßes gehängt und in Wasser gesenkt, so ist das Gleichgewicht gestört, die andere Wagschale sinkt; sie hebt sich aber wieder auf die frühere Höhe, wenn man das Gefäß voll Wasser gießt; folglich hatte der Körper durch das Einsenken das Gewicht der gleich großen Wassermenge verloren. — Man kann vermöge des Auftriebes im Wasser Körper heben, die man in der Luft kaum zu lüpfen vermöchte. Der Auftrieb und das Archimedische Princip erklären insbesondere das Verhalten der Körper in Flüssigkeiten, das Schwimmen, und finden eine wichtige Anwendung zur Bestimmung des specifischen Gewichtes der Körper.

Das (natürliche) Schwimmen. Ist ein Körper specifisch schwerer als eine Flüssigkeit, in welche er eingetaucht ist, so ist sein Abtrieb größer als sein Auftrieb, folglich muß er zu Boden sinken. Ist ein Körper gerade so schwer als die Flüssigkeit, so ist sein Abtrieb gleich dem Auftriebe, folglich wird der Abtrieb aufgehoben: der Körper schwebt in der Flüssigkeit (der Plateau'sche Versuch). Ist ein Körper leichter als die Flüssigkeit, in welche er eingetaucht ist, so ist der Abtrieb kleiner als der Auftrieb; folglich wird der Körper auf die Oberfläche des Wassers gehoben: er schwimmt auf der Flüssigkeit. 162

So steigt ein unter Wasser gedrückter Kork beim Loslassen rasch auf, unter Wasser ausgegossenes Oel, unter Quecksilber ausgegossenes Wasser steigen in kugeligen Tropfen in die Höhe, und verschiedene, nicht chemisch auf einander wirkende und nicht in einander diffundirende Flüssigkeiten lagern sich nach ihrem specifischen Gewichte über einander. Auch das Diffundiren geschieht nur allmälig gegen die Schwere, Weingeist bleibt lange auf Wasser stehen, das oberste Meerwasser ist noch weit außerhalb der Flußmündung süß. Eisen steigt in Quecksilber auf und schwimmt auf demselben wie Kork in Wasser; der Auftrieb von Grundeis kann so groß werden, daß dasselbe Steine und Pflanzen vom Boden reißt. Luft, welche unter Wasser frei wird, erhebt sich in kugeligen Blasen und steigt in einem fast ganz mit Flüssigkeit erfüllten Gefäße an die höchste Stelle. Darauf beruht die Libelle, welche zum Horizontalstellen aller physikalischen und geometrischen Instrumente, zum Nivelliren u. s. w. benutzt wird; dieselbe besteht aus einer, mit Ausnahme der oberen Mittelfläche in Messing gefaßten gläsernen Röhre oder Dose, die mit Alkohol oder Aether beinahe ganz erfüllt ist; die mittelste Stelle der oberen Mittelfläche ist durch Linien markirt. Ist nun irgend eine Randstelle höher als die Mittelstelle, so geht die Luftblase an die Randstelle; steht aber die Libelle genau horizontal, so befindet sich die Blase an der markirten Mittelstelle. Auch das Heben versunkener Gegenstände durch Kautschukschläuche beruht auf dem Emporsteigen von Luft in Wasser.

Ein leichter Körper steigt in Flüssigkeit so weit in die Höhe, bis das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit nur noch seinem eigenen Gewichte gleich ist; denn alsdann ist der Abtrieb dem Auftriebe gleich. Hat der schwebende Körper eine solche Lage, daß sein Schwerpunkt mit dem Schwerpunkte der verdrängten Flüssigkeit in einer Senkrechten liegt, so schwimmt er in Ruhe; denn die den Körper tragende Kraft ist das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit, welches seinen Angriffspunkt in dem Schwerpunkte derselben hat; dieser Schwerpunkt ist demnach, so zu sagen, der Aufhängepunkt des schwimmenden Körpers, welcher Punkt für den Fall der Ruhe bekanntlich in einer Lothrechten mit dem Schwerpunkte des Körpers liegen muß. — Liegt der Schwerpunkt des Körpers tiefer, als der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit, so schwimmt der Körper stabil; denn sein Schwerpunkt liegt alsdann tiefer als sein Aufhängepunkt. Für im Wasser schwebende Körper findet stabiles Schwimmen nur unter dieser Bedingung statt; dagegen ein auf dem Wasser schwimmender Körper kann auch dann stabil schwimmen, wenn sein Schwerpunkt über demjenigen des verdrängten Wassers liegt; indessen muß der erste Schwerpunkt dann wenigstens tiefer liegen als das Metacentrum, d. i. als derjenige Punkt, in welchem eine durch den Schwerpunkt des verdrängten Wassers gezogene Lothrechte die Mittelachse oder Schwimmachse des Körpers schneidet. Denn auf den schwimmenden und aus seiner aufrechten Lage gebrachten Körper (Fig. 91) wirken zwei Kräfte ein, sein eigenes Gewicht G in seinem Schwerpunkte s abwärts und der Auftrieb G′ in dem Schwerpunkte s′ des verdrängten Wassers nach s′m senkrecht aufwärts. So lange nun das Metacentrum m über s liegt, streben diese beiden Kräfte den Körper in die frühere Lage zurück zu drehen. Dies ist um so länger möglich, und um so größer ist daher die Stabilität, je tiefer der Schwerpunkt des Körpers liegt, je größer das Gewicht des Körpers ist, und je weiter er aus seiner Lage gebracht werden kann, ohne daß m unter s rückt, was vorwiegend von der Gestalt des Körpers abhängt. Diese Verhältnisse sind besonders wichtig bei dem Bau und der Belastung der Schiffe. — Fällt das Metacentrum in den Schwerpunkt s, so heben die beiden Kräfte einander auf, der Körper schwimmt indifferent; fällt das Metacentrum unter den Schwerpunkt, so drehen die beiden Kräfte den Körper in der eingeschlagenen Richtung weiter, er schwimmt labil.

Fig. 91.



Indifferent schwimmt z. B. eine gleichartige Kugel. labil schwimmen aufrechte Stäbe, Balken, Bretter, geschlossene Röhren, sie drehen sich sogleich in die stabile Längenlage. In aufrechter Stellung können sie indessen auch stabil schwimmen, wenn man durch starkes Beschweren des unteren Endes den Schwerpunkt sehr tief legt. Hierauf beruhen die Schwimmstäbe zum Messen der Flußgeschwindigkeit und die Schwimmwagen oder Aräometer zum Bestimmen der Dichte. (Der cartesianische Taucher). Die Fische schwimmen stabil, weil durch die im Rücken liegende Schwimmblase der obere Körpertheil leichter gemacht ist; diese Blase dient den Fischen auch zum Auf- und Absteigen; denn durch Vergrößern derselben vergrößern sie auch ihren Körper und hiermit das Volumen des ver-

drängten Wassers, also den Auftrieb. — Damit die Schiffe stabil schwimmen, verlegt man mittels des Ballastes den Schwerpunkt möglichst in die Tiefe; ein unbelastetes Schiff muß soviel Ballast einnehmen, daß bei der möglich größten Schwankung das Metacentrum noch über dem Schwerpunkte des Schiffes liegt; im anderen Falle würde das Schiff kentern, d. i. umschlagen. — Die Schiffe können auch von Metall, von Eisen oder Kupfer sein, ohne unterzusinken; denn durch ihren großen Hohlraum kann doch leicht das Gewicht des verdrängten Wassers so groß werden, daß es das Gewicht des Schiffes übertrifft. Man hat hier das Metall gewissermaßen mit Luft verbunden; ebenso kann man auch andere schwerere Körper durch Verbinden mit sehr leichten zum Schwimmen befähigen; darauf beruhen die Transporte riesiger norwegischer Granitblöcke durch Eisberge der Urzeit in die norddeutsche Ebene, sowie die Schwimmgürtel und Schwimmringe, mittels derer des künstlichen Schwimmens Unkundige sich über Wasser halten und Kundige große Strecken durchschwimmen können. Die Menschen sind meist etwas specifisch schwerer als Wasser; das Schwimmen derselben ist daher nicht natürlich, sondern künstlich, ein stetes Wehren mittels des Widerstandes des Mediums gegen das Untersinken, was um so leichter gelingt, je tiefer man eintaucht, und am leichtesten auf dem Rücken, weil dann auch der sehr schwere Kopf eintaucht, und wenn man den Athem anhält, weil sich dann das eingetauchte Volumen vergrößert; nur sehr fette Personen schwimmen natürlich, wie der Neapolitaner Paolo Muccia (1767), der 300 Pfund wog und 30 Pfund weniger als ein gleiches Wasservolumen. Der Bau der Thiere macht sie geschickter zum Schwimmen, als es der Mensch ist; auch sind sie meist etwas leichter wie Wasser. — Schwimmende Gegenstände steigen und fallen mit der Flüssigkeit; darauf beruht die Anwendung von Schwimmern an Dampfkesseln zu Wasserstandzeigern und zu selbstthätigen Speisevorrichtungen, an Gasuhren zum Abschließen des Zuflusses von Gas und zur Constanthaltung des Niveaus u. s. w.

163

Aufg. 231. Wie groß ist der Gewichtverlust eines rechteckigen Körpers von 50^{cm} Länge, 6^{cm} Höhe und 8^{cm} Breite, der ganz in Wasser taucht? Aufl.: 960^{g}. — A. 232. Wie groß ist der Gewichtverlust einer ganz in Quecksilber getauchten Platinkugel von 4^{cm} Durchmesser? Aufl.: $455{,}7^{g}$. — A. 233. Wie groß ist der Auftrieb eines Holzcylinders von 20^{cm} Höhe und 10^{cm} Durchm. in Weingeist, dessen spec. Gewicht $= 0{,}8$? Aufl.: $1256{,}6^{g}$. — A. 234. Wie groß ist die Steigkraft dieses Cylinders in Wasser, wenn das spec. Gew. des Holzes $= 0{,}6$ ist? Antw.: Die Steigkraft ist gleich dem Auftriebe weniger dem Abtriebe $= 628{,}32^{g}$. — A. 235. Wie groß ist die Steigkraft einer Korkkugel, Durchm. $= 8^{cm}$, spec. Gew. $= 0{,}24$, in Wasser? Aufl.: $203{,}7^{g}$. — A. 236. Die Steigkraft einer Eisenkugel (Durchm. $= 10^{cm}$, sp. Gew. $= 7{,}5$) in Quecksilber zu finden. Aufl.: 3194^{g}. — A. 237. Wie groß ist der Auftrieb einer Platinkugel (sp. G. $= 22$) von $1/2^{kg}$? Antw.: der Auftrieb, d. i. das Gew. des verdrängten Wassers ist 22 mal kleiner als das abs. G., also $= 22{,}7^{g}$. — A. 238. Wie groß ist der Gewichtverlust eines Eisenkörpers von 10^{kg}. (spec. G. $= 7{,}5$) in Wasser? Aufl.: $1{,}33^{kg}$. — A. 239. Was wiegt im Wasser ein Sandstein von 100^{kg} (spec. G. $= 2{,}5$)? Aufl. 60^{kg}. — A. 240. Was wiegt in Quecksilber eine Platinkugel von 300^{g}? Aufl.: 114^{g}. — A. 241. — Was wiegt in Weingeist eine Holzkugel von 100^{g}; sp. G. $= 0{,}9$? Aufl.: $11\,1/9^{g}$. — A. 242. Der Gewichtverlust eines Körpers in Wasser beträgt 23^{g}, welches ist sein Volumen? Aufl.: 23^{ccm}. — A. 243. Eine Kugel verliert in Wasser $4188{,}8^{g}$; wie groß ist ihr Halbmesser? Aufl.: 10^{cm}. — A. 244. Wie viel ^{kg} kann Jemand in der Luft heben, der in Wasser einen 150^{kg} schweren Stein (spec. G. $= 2{,}5$) heben kann? Aufl.: 90^{kg}. — A. 245. Was wiegt ein Holzblock, 3^{m} lang, $0{,}5^{m}$ breit, der $0{,}2^{m}$ tief in Wasser taucht? Aufl.: 300^{kg}. — A. 246. Wie tief sinkt ein kupferner Cylinder (sp. G. $= 9$) von 10^{cm} Durchm. und Höhe in Quecksilber ein? Aufl.: $x \cdot 13{,}6 = 10 \cdot 9$, hieraus $x = 6{,}6^{cm}$ — A. 247. Wie tief sinkt eine silberne Kugel (sp. G. $= 10$) in Quecksilber ein, $r = 10^{cm}$. Aufl.: $4/3\pi r^3 \cdot 10 = 1/3\pi x^2 (3r - x) \cdot 13{,}6$, woraus $x = 13^{cm}$ — A. 248. Wie tief muß ein kegelförmiger Eisberg, der außerhalb des Wassers 60^{m} hoch und 100^{m} weit ist, in das Wasser eintauchen; sp. G. des Eises $= 0{,}9$? Aufl.: $\frac{1}{3} \cdot \frac{\pi r^2 (h + x)^2}{h^2} \cdot (h + x)\, 0{,}9 = \frac{x}{3}\left[\frac{(h + x)^2 \pi r^2}{h^2} + \frac{(h + x)\pi r}{h} + \pi r^2\right]$, woraus $x = 60^{m}$. — A. 249. Wenn der Eisberg etwa ein rechteckiger Körper ist und 1000^{m} Länge, 200^{m} Breite und 100^{m} Höhe hervorragen, wie tief muß er dann eingetaucht sein, und welches Volumen besitzt der eingetauchte Theil? Aufl.: $x = 900^{m}$; eingetauchtes Volumen $= 180$ Mill. ^{cbm}. — A. 250. Welche Last würde dieser Eisberg tragen können, wenn er durch dieselbe ganz eintauchen sollte? Aufl.: 20000 Mill. ^{kg}. — (Erratische Blöcke). — A. 251. Wie viel ^{kg} Kork müssen mit einem ^{kg} Silber verbunden werden, damit dasselbe im Wasser schwebt? Aufl.: $1/10 + x/0{,}24 = 1 + x$, woraus $x = 27/95^{kg}$. — A. 252. Wie viel Kork muß ein Mensch von 60 ^{kg} und 1,2 sp. G. mit sich verbinden, um natürlich zu schwimmen? Aufl.: $60 : 1{,}2 + x : 0{,}24 = 60 + x$, woraus $x = 3\,3/19^{kg}$. — A. 253. Ein Kasten von Kupferblech, dessen ^{qcm} 3^{g} wiegt, und welcher 50^{cm} lang,

30cm breit und 20cm hoch ist, schwimmt wie tief im Wasser? Aufl.: 12,4cm. — A. 254 Wie tief taucht eine Hohlkugel von 20cm Dm. aus diesem Blech in Wasser ein? Aufl.: $\pi . 20^2 . 3 = \frac{1}{3} \pi x^2 (30 - x)$, woraus $x = 14$cm. — A. 255. Die Krone des Hiero von Syracus wog 10 kg; was mußte sie im Wasser verlieren, wenn sie reines Gold oder reines Silber war? Aufl.: Gold ½ kg, Silber 1 kg, wenn sp. G. d. Goldes = 20, des Silbers = 10. — A. 256. Was mußte sie verlieren, wenn sie 6 kg Gold und 4 kg Silber enthielt? $\frac{6}{20} + \frac{4}{10} = 0{,}7$ kg. — A. 257. Sie verlor 0,625 kg, wie viel Gold und Silber enthielt sie demnach? Aufl.: $x : 20 + (10 - x) : 10 = 0{,}625$, woraus $x = 7{,}5$ kg Gold und 2,5 kg Silber.

164 **Bestimmung des specifischen Gewichtes.** Das specifische Gewicht eines Körpers ist, wie schon in 19. angeführt, das Gewicht der Volumeinheit desselben. Bei festen und tropfbar flüssigen Körpern wird die Volum- und die Gewichtseinheit so gewählt, daß das spec. Gewicht des Wassers = 1 ist; hierüber belehrt folgende Zusammenstellung:

Volumeneinheit.			Zugehörige Gewichtseinheit.
1 Cubikmeter oder Kiloliter	Wasser	wiegt	1 Tonne = 1t
1 Cubikdecimeter oder Liter	„	„	1 Kilogramm = 1kg
1 Cubikcentimeter	„	„	1 Gramm = 1g
1 Cubikmillimeter	„	„	1 Milligramm = 1mg.

Bei Gasen wählt man häufig das Cubikmeter als Volumeinheit und das Kilogramm als Gewichtseinheit, oder das Cubikdecimeter als Volum-, das Gramm als Gewichtseinheit, versteht also unter dem spec. Gew. der Gase manchmal die Zahl der Kilogramme, die ein Cubikmeter des Gases wiegt. Bei den festen und flüssigen Körpern aber gibt nach obiger Feststellung das spec. Gew. an, wie viele Tonnen ein Cubikmeter, wie viele Kilogramm ein Cubikdecimeter, wie viele Gramm ein Cubikcentimeter und wie viele Milligramm ein Cubikmillimeter des Körpers wiegt. Weil das Gewicht der Volumeinheit Wasser, also das spec. Gew. des Wassers = 1 ist, so gibt das spec. Gew. eines festen oder flüssigen Körpers auch an, wie viel mal so schwer ein beliebiges Volumen des Körpers ist als ein gleiches Volumen Wasser.

Bezeichnet man das Gewicht eines Körpers mit p, das Volumen desselben mit v und das spec. Gew. desselben mit s, so hat das Volum 1 das Gewicht s, mithin das Volum v ein vmal so großes Gewicht $vs = p$, woraus

$$1)\ p = v . s; \quad 2)\ v = p : s; \quad 3)\ s = p : v,$$

welche wichtigen Beziehungen in der Form an diejenigen zwischen dem Gewicht und der Masse eines Körpers, sowie der Beschleunigung der Schwere erinnern, oder allgemeiner an die Relationen zwischen einer Kraft, einer Masse und der Beschleunigung, welche die Kraft der Masse ertheilt. Wie sind die drei Beziehungen in Worten auszudrücken?

Da nach der dritten Beziehung das spec. Gew. eines Körpers gleich dem absoluten Gewichte desselben dividirt durch das Volumen desselben ist, da man also zur Bestimmung des spec. Gew. das abs. Gew. und das Volumen kennen muß, so ist es naturgemäß, die Bestimmung des specifischen Gewichtes mit solchen Fällen zu beginnen, in welchen die beiden nothwendigen Größen leicht der Messung zugänglich sind. Das Gewicht p bestimmt man mit Hilfe der Wage; die Ermittelung des Volumens v hat keine Schwierigkeit 1. bei festen Körpern, die eine einfache geometrische Gestalt haben; in diesem Falle kann die Bestimmung von v durch Berechnung geschehen; Beispiele: Würfel, Parallelepipedon, Prisma, Cylinder, Pyramide, Kegel, Kugel. 2. bei tropfbar flüssigen Körpern; hier benutzt man entweder ein Fläschchen, dessen Inhalt bekannt ist, z. B. = 10 Cubikcentimeter; bestimmt man in diesem Falle das Gewicht der von dem Fläschchen aufgenommenen Flüssigkeit in Grammen, so braucht das Komma an der Zahl des Gewichtes nur eine Stelle nach links gerückt zu werden, wodurch man sofort

das spec. Gew. der Flüssigkeit hat. Oder man benutzt ein ganz willkürliches Fläschchen, dessen Inhalt man erst nach der zweiten Beziehung bestimmt; man füllt das Fläschchen mit einer beliebigen Flüssigkeit, deren spec. Gew. bekannt ist (Wasser, Quecksilber), sucht das Gewicht der eingefüllten Flüssigkeit und berechnet dann v nach der Formel $v = p : s$. Hat man Wasser gewählt, so enthält das Fläschchen so viele Cubikcentimeter, als das Wasser Gramme wiegt.

Hat ein fester Körper eine unregelmäßige Gestalt, so kann man sich behufs Ermittelung des Volumens v einer hydrostatischen Wägung bedienen; erfährt der Körper in einer Flüssigkeit den Gewichtsverlust p', so bedeutet p' nach dem Archimedischen Princip das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit; hat diese ferner das spec. Gew. s', so ist das Volum der verdrängten Flüssigkeit und somit auch das des festen Körpers $v = p' : s'$. Da nun das spec. Gew. des festen Körpers $s = p : v$, so ist s auch $= p : (p' : s') = (p : p') s'$. Nimmt man die hydrostatische Wägung in Wasser vor, so ist speciell $s' = 1$, daher $s = p : p'$. **Das specifische Gewicht eines festen Körpers ist gleich dem absoluten Gewichte desselben, dividirt durch seinen Gewichtsverlust im Wasser.**

Die hydrostatische Wägung hat also den Zweck, das Volumen des festen Körpers zu bestimmen; der Körper enthält so viele Cubikcentimeter, als sein Gewichtsverlust im Wasser Gramme beträgt. In früherer Zeit faßte man das spec. Gewicht vorwiegend als die Verhältnißzahl auf, welche angibt, wie viel mal so viel ein Körper wiegt als ein gleiches Volumen Wasser. Bei dieser Auffassung hat die hydrostatische Wägung den Zweck, das Gewicht eines Wasserkörpers zu erfahren, dessen Volumen mit demjenigen des festen Körpers übereinstimmt; denn der Gewichtsverlust in Wasser gibt ja das Gewicht des verdrängten Wassers, also das dem Körpervolumen gleichen Wasservolumens an. Kennt man außerdem das Gewicht des Körpervolumens, so hat man nur noch dieses Gewicht durch das Gewicht des gleichen Wasservolumens, also durch den Gewichtsverlust zu dividiren, um zu erfahren, wie viel mal so viel der Körper wiegt als das gleiche Volumen Wasser, wodurch der Satz über das spec. Gew. auch von dieser Seite her klar wird.

Fig. 92.



165

Die **hydrostatische Wägung** kann geschehen mittels der hydrostatischen Wage und mittels Nicholsons Aräometer (ἀραιός, dünn, locker).

1. An den Haken der kurzen Wagschale hängt man mit feinen Fäden den zu prüfenden Körper und bestimmt durch Auflegen von Gewichten auf die andere Schale das absolute Gewicht; dann schiebt man unter den Körper ein Glas Wasser, so daß derselbe tief eintaucht; er wird sich dann heben; um das Gleichgewicht herzustellen, legt man Gewichte auf die kurze Schale; diese Gewichte geben den Gewichtsverlust; in Grammen ausgedrückt geben sie aber auch das Volumen des Körpers in ccm an.

2. **Nicholsons Aräometer**, Fig. 92. Man legt den Körper auf den Teller t und fügt so viel Gewicht zu, daß der Apparat bis zur Marke m ins Wasser sinkt, in welchem er vermöge der schweren Kugel s stabil schwimmt. Nimmt man nun den Körper weg und legt an seine Stelle Gewichte, welche wieder das Einsinken bis zur Marke bewirken, so sind diese Zulagegewichte das absolute Gewicht des Körpers. Werden auch diese weggenommen und der Körper in das Körbchen k gebracht, so müssen abermals Gewichte auf den Teller t gelegt werden, um das Einsinken bis zur Marke zu veranlassen, und diese geben den Gewichtsverlust in Wasser, also auch das Volumen in ccm an.

Diese Apparate können auch zur Bestimmung der spec. Gewichte der Flüssigkeiten benutzt werden. Sucht man mittels der hydrostatischen Wage den Gewichtsverlust eines Messingwürfels in Wasser, so hat man das Gewicht eines gleich großen Wasserwürfels; ermittelt man dann in derselben Weise den Gewichtsverlust desselben Würfels in einer anderen Flüssigkeit, so kennt man das Gewicht eines gleichen Würfels dieser Flüssigkeit. Dividirt man das letztere Gewicht durch das erstere, so erhält man das sp. G. der Flüssigkeit.

Kennt man das Gewicht des Nicholson'schen Aräometers, und addirt hierzu die Zulagegewichte, welche das Einsinken bis zur Marke bewirken, so erhält man das Gewicht des verdrängten Wasservolums; verfährt man ebenso für eine andere Flüssigkeit, und dividirt das letztere Gewicht durch das erstere, so gibt der Quotient das spec. Gew. der Flüssigkeit an.

Das Skalen-Aräometer. Volumeter von Gay-Lussac, Densimeter von Schmidt. Je leichter eine Flüssigkeit ist, desto tiefer muß ein und derselbe Körper in dieselbe einsinken, damit das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit demjenigen des Körpers gleich sei; die verdrängten Volumina müssen sich umgekehrt verhalten wie die sp. G. der Flüssigkeiten. Hierauf beruhen die Skalen-Aräometer, von welchen das Volumeter das sp. G. einer Flüssigkeit leicht berechnen läßt. Eine geschlossene, unten erweiterte und durch eine mit Quecksilber gefüllte Kugel stabil schwimmende Glasröhre trägt an dem Punkte, bis an welchen sie im Wasser einsinkt, die Zahl 100, und trägt über und unter diesem Punkte Theilstriche, an welchem das Volumen der Röhre um 0,01 größer oder kleiner ist. Sinkt ein Körper bis zu dem Striche 125, so verhält sich das spec. G. der Flüssigkeit zu dem des Wassers, wie 100 : 125, ist also = 0,8. — Bei dem Densimeter läßt sich an den Theilstrichen das sp. G. selbst ablesen.

Ist ein Körper im Wasser löslich, so bestimmt man nach einer dieser Methoden, wie viel mal schwerer er ist als eine andere Flüssigkeit, wie Weingeist oder Oel, die ihn nicht löst, deren spec. G. aber schon bekannt ist; das Product dieser beiden Zahlen ergibt dann das gesuchte sp. G. — Ebenso kann man mit Körpern verfahren, die leichter sind als Wasser; oder man kann sie auch mit schwereren Körpern verbinden und von dem Gewichtsverluste der Verbindung denjenigen des schwereren Körpers abzählen, wodurch man den des leichteren, d. h. das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser erhält. — Bei sehr genauen Bestimmungen, die einen wissenschaftlichen Werth und Zweck haben sollen, muß man auch auf die Reinheit und Temperatur des Wassers, auf Luftblasen und Wasserabsorption, auf das Gewicht der Aufhängefäden u. drgl. aufmerksam sein.

166 Luftförmige Körper. Man pumpt einen zum Aufhängen an einer Wage eingerichteten Glasballon luftleer und bringt ihn dann an der Wage ins Gleichgewicht. Läßt man dann Luft einströmen, so sinkt der Ballon; die Gewichte, die man zur Herstellung des Gleichgewichtes auf die andere Schale zulegen muß, geben das Gewicht der eingeströmten Luft an. Ebenso findet man das Gewicht eines gleichen Volumens Wasser und erfährt dann durch Division, daß die Luft das spec. Gewicht 0,001293 hat, d. h. etwa 777mal leichter ist als Wasser. Weil bei der Vergleichung von Luftarten mit Wasser zu kleine Zahlen entstehen, die unserem Vorstellungsvermögen wenig zusagen, so legt man für die sp. G. der Luft- und Dampfarten auch die atmosphärische Luft zu Grunde. Indem man den genannten Ballon mit anderen Luft- oder Dampfarten füllt und die zur Herstellung des Gleichgewichtes nöthigen Zulagegewichte mit denen des ersten Versuches vergleicht, findet man die sp. Gewichte solcher Luftarten.

Diese Methode ist ungenau wegen der Veränderung des Glasballons mit dem Drucke, mit der Temperatur und mit der Luftart, wegen des Gewichtverlustes, den der Ballon auch in der Luft erleidet u. s. w.; Regnault hat daher in neuerer Zeit die Methode vervollkommnet. Die genaue Bestimmung der Dampfdichte gehört der Wärmelehre an.

167 Tafel einiger specifischen Gewichte bei 0° C.

Platin	22,1	Jod	4,95	Bernstein	1,08	Brom	2,97	Joddampf	8,7[illegible]
Gold	19,3	Schwerspath	4,43	Wachs	0,97	Schwefels.	1,85	Schwefeld.	6,6[illegible]
Wolfram	17,6	Diamant	3,52	Eis	0,88	Salpeters.	1,19	Quecksilberd.	6,9[illegible]
Blei	11,4	Flintglas	3,44	Ebenholz	1,23	Salzsäure	1,52	Chlor	2,[illegible]
Silber	10,5	Krystallglas	2,89	Eichenholz	1,17	Glycerin	1,26	Flußsäure	2,[illegible]
Kupfer	8,88	Flaschenglas	2,60	Ahorn	0,90	Milch	1,03	Schwefl. S.	2,[illegible]
Messing	8,39	Spiegelglas	2,37	Buchenholz	0,80	Meerwasser	1,03	Salzs.-G.	1,[illegible]
Stahl	7,82	Marmor	2,83	Tannenholz	0,70	Rheinwein	0,99	Kohlendioxyd	1,[illegible]
Schmiedeeis.	7,79	Quarz	2,65	Erlenholz	0,60	Leinöl	0,95	Sauerstoff	1,[illegible]
Zinn	7,29	Gyps	2,31	Lindenholz	0,50	Baumöl	0,92	Stickstoff	0,[illegible]
Gußeisen	7,21	Schwefel	2,03	Pappelholz	0,40	Erdöl	0,84	Ammoniak	0,[illegible]
Zink	7,21	Alabaster	1,87	Korkholz	0,24	Alkohol	0,79	Wasserdampf	0,[illegible]
Antimon	6,71	Elfenbein	1,92	Quecksilber	13,6	Aether	0,71	Wasserstoff	0,[illegible]

Das sp. G. gibt ein Urtheil darüber, wie schwer, im gewöhnlichen Sinne gesprochen, die Stoffe im Verhältnisse zu einander sind. Das spec. Gew. des Platins ist 22, d. h. 1ccm Platin wiegt 22g, das Platin ist 22 mal so schwer als Wasser, es ist der schwerste von allen Körpern. Das sp. G. des Diamantes ist 3½, d. h. 1 hessischer Cubikzoll Diamant, wie der Diamant des türkischen Kaisers, wiegt 3½ Loth (denn 1 c'' hess. Wasser wiegt 1 Loth). Das sp. G. des Quecksilbers ist 13,6, d. h. 1cbdm oder 1l Quecksilber

wiegt 13,6kg, das Quecksilber ist fast 14mal schwerer als Wasser, es ist die schwerste Flüssigkeit. Blei ist halb so schwer als Platin, Kupfer doppelt so schwer als Schwerspath, 8 mal so schwer als Bernstein, 37 mal so schwer als Korkholz; Platin, der schwerste Körper, ist 230000 mal so schwer als Wasserstoff, der leichteste Körper; Wasser ist mehr als 10000 mal so schwer, wie sein Hauptelement, der Wasserstoff.

Nach dem Metersystem, das wir auch in der Lehre vom sp. Gew. vollständig durchgeführt haben, ist die Berechnung des Gewichtes irgend eines bekannten Körpervolumens eine einfache Aufgabe: man hat einfach das Volumen mit dem sp. G. zu multipliciren, $p = vs$. Bei den alten Maß- und Gewichtsystemen mußte man für derartige Rechnungen, wie in den Aufgaben 280 bis 285 einige vorkommen, das Gewicht γ einer Volumeinheit, z. B. von 1 Cubikfuß (c') Wasser kennen; dann ist $p = vs\gamma$. Ein preußischer c' Wasser wog 61,74 ℔., ein badischer c' 54 ℔., ein hessischer c' 31,75 ℔.

Vergleichung der Dichte von Flüssigkeiten. In vielen Fällen des practischen Lebens ist es von Interesse, die Dichten mehrerer Flüssigkeiten derselben Art zu vergleichen; Salzsoolen, Zuckerlösungen, Most, Schwefelsäure u. s. w. sind um so besser, je dichter sie sind, je weniger tief also ein und dasselbe Aräometer in diese Flüssigkeiten einsinkt; Weingeist, Branntwein u. dgl. sind um so besser, je mehr sie reinen Alkohol enthalten, je weniger dicht sie also sind und je tiefer ein Aräometer in dieselben einsinkt. Man hat daher an beliebigen Schwimmwagen, Senkwagen, Aräometern beliebige Skalen angebracht und schätzt die Flüssigkeiten nach den Graden, bis zu welchen das Aräometer einsinkt. Leider sind bei den meisten Aräometern, von Beaumé, Cartier, Beck u. s. w., die Anfangspunkte und die Skalen ganz willkürlich gewählt, und haben diese daher wohl praktischen, aber keinen wissenschaftlichen Werth. Nur die Procent-Aräometer (für Alkohol von Gay-Lussac und Tralles) und die Oechsle'sche Mostwage machen hiervon eine Ausnahme. 168

Bei gemischten Flüssigkeiten würde man den Gehalt derselben aus dem spec. G. der Bestandtheile und der Mischung berechnen können, wenn das spec. G. der Mischung das arithmetische Mittel aus den sp. Gew. der Bestandtheile wäre. Wenn dies auch manchmal der Fall ist, so gilt es doch meistens dann nicht, wenn die Mischung mit einer Lösung oder einer chemischen Einwirkung verbunden ist. So findet bei dem Mischen von Alkohol mit Wasser eine Raumverminderung statt, welche aber ebenfalls nicht einem bestimmten Gesetze gehorcht. Man hat daher durch Versuche alkoholometrische Tabellen aufgestellt, welche für jeden beliebigen Alkoholgehalt das spec. G. der Mischung angeben. Hat man daher Aräometer, welche sp. G. angeben, so kann man aus einer solchen Tabelle den Alkoholgehalt entnehmen, wenn man das sp. G. einer Mischung mit einem solchen Aräometer gefunden hat. Besonders brauchbar sind dieselben, wenn sie auf der Skale gerade diejenigen sp. Gew. enthalten, die nach den Tabellen einem bestimmten Procentgehalte von Weingeist entsprechen; dies ist bei den Alkoholometern von Tralles der Fall, welchen auch noch erweiterte Tabellen für verschiedene Temperaturen beigegeben sind, und welche in Deutschland zum gesetzlichen Messen des Spiritus eingeführt wurden. — In ähnlicher Weise gibt die Oechsle'sche Mostwage den Procentgehalt des Mostes an Traubenzucker an; 100 Grade entsprechen 20, 60 Grade 12 Gewichtprocenten Zucker. Doch ist das Resultat einer solchen Messung nicht ganz zuverlässig, weil auch noch andere Stoffe Einfluß auf die Dichte des Mostes haben. Gleiches gilt von den Salzspindeln, Soolwagen u. s. w.; noch unzuverlässiger sind die Milchwagen; für Bier und Wein sind Aräometer als Maß der Güte ganz verwerflich.

169 **Aufg.** 258. Ein Stück Zinn von 12ccm wiegt 86,52g; welches ist das sp. G. des Zinkes? Aufl.: 86,52 : 12 = 7,21. — A. 259. Stücke Silber, Kupfer, Schwerspath, Marmor, Quarz von 10, 11, 12, 13, 14ccm wiegen bezüglich 105; 97,68; 53,16; 36,79; 35,1g; berechne die sp. G.? — A. 260. Ein Schoppen Quecksilber wiegt 13,6 ℔.; wie groß ist das sp. G.? — A. 261. Ein Liter Schwefelsäure wiegt 1533g; wie groß ist das sp. G.? Aufl.: 1,533. — A. 262. Ein Stück Platin von 1kg verliert in Wasser 45g; sp. Gew.? Aufl.: 22,22. — A. 263. Ein Stück Eisen von 3kg wiegt in Wasser 2,6kg; sp. Gew.? Aufl.: 7,5. — A. 264. Ein Stück Sandstein von 2,4kg wiegt in Wasser 1,4kg; sp. G.? Aufl.: 2,4. — A. 265. Ein Stückchen Flußspath wird auf den Teller der Senkwage gelegt; dazu müssen für das Einsinken bis zur Marke 19,3g und dann an seine Stelle 3,1g; wenn es in das Körbchen gelegt wird, dürfen auf dem Teller nur 21,4g liegen; sp. G.? Aufl.: 3,10. — A. 266. Auf dem Teller liegen 30,5g; neben einem Stückchen Quarz nur [illegible]g; wenn der Quarz im Körbchen liegt, dagegen 28,9g; spec. G.? Aufl.: 2,6. — A. 267. Ein Stück Ahornholz von 3,6g wiegt in absolutem Alkohol 0,44g; sp. G.? Aufl.:

0,9. — A. 268. Ein Stück Buchenholz von 3g verliert in Aether 2,66g; sp. G.? Aufl.: 0,8. — A. 269. Ein Stück Kochsalz von 4,5g verliert in Leinöl 2,14g; sp. G.? Aufl.: 2. — A. 270. Ein Stück Kupfervitriol von 6g verliert in Erdöl 2,3g; sp. G.? Aufl.: 2,2. — A. 271. Ein Messingwürfel von 3ccm Inhalt verliert mit einem Stück Holz von 3,5g Gewicht in Wasser 8g; sp. G. des Holzes? Aufl.: 0,7. — A. 272. Eine Messingkugel von 16,78g wiegt mit einem Stücke Wachs von 1,94g in Wasser zusammen 14,72g; sp. G. des Wachses? Aufl.: 0,97. — A. 273. Ein Stück Zink wiegt 36,05g; welches ist sein Volumen? Aufl.: 5ccm. - A. 274. Ein Stück Eis wiegt 88g; Vol.? Aufl.: 100ccm. — A. 275. Mittels Kopps Volumenometer fand man das Volumen von 1000g gepulpertem Bimsstein 465ccm, Stärkemehl 641ccm, Flachs 690ccm, roher Seide 640ccm, Baumwolle 787ccm; sp. G.? Aufl.: 2,15; 1,56; 1,54; 1,56; 1,27. — A. 276. Ein Tausendgranfläschchen d. i. ein Fläschchen, das 1000 Gran Wasser faßt, faßt 13598 Gran Quecksilber, 2966 Gran Brom, 1848 Gran Schwefelsäure, 1272 Gr. Schwefelkohlenstoff, 1022 Gr. Malaga, 872 Gr. Terpentinöl, 868 Gr. Benzol, 715 Gr. Aether; spec. Gew.? Aufl.: 13,598; 2,966; 1,848; 1,272; 1,022; 0,872; 0,868; 0,715. — A. 277. Ein Platinwürfel verliert in Wasser 2g, in Quecksilber 27,2g; spec. G.? Aufl.: 13,6. — A. 278. Eine Glaskugel verliert in Wasser 7,272g, in Weingeist 5,86g; sp. G.? Aufl.: 0,79. — A. 279. Ein Aräometer wiegt 13,5g; in Wasser muß man für das Einsinken bis zur Marke 7g, in Spiritus 0,85g zulegen; sp. G.? Aufl.: 0,7. — A. 280. Was wiegt ein rechteckiges Stück Quarz, 15cm hoch, 8cm breit, 6cm dick; spec. Gew. = 2,654? Gewicht $P = 15 . 8 . 6 . 2{,}654 = 1910{,}88$g. — A. 281. Was wiegt eine gußeiserne walzenförmige Stange von 5cm Durchmesser und 120cm Höhe? $P = \frac{1}{4} . 3{,}1416 . 5^2 . 120 . 8{,}21 = 16\,988$g = 17kg ca. — A. 282. Wie groß müßte ein goldener Würfel sein, um 1 Million fl. werth zu sein, wenn das spec. Gewicht des Goldes 19,258 ist und 1kg Gold 1600 fl. kostet?

Zahl der kg = $1000000/1600 = 625$. Daher die Gleichung
Seite des Würfels = xcm $19{,}258\,x^3 = 625 . 1000$
Inhalt des Würfels = x^3ccm Daraus $x = \sqrt[3]{\frac{625000}{19{,}258}} = 31$c.
Gewicht des Würfels = $19{,}258\,x^3$ g

A. 283. Wie groß müßte ein Kegel von Ahornholz von gleicher Weite und Höhe sein, um 2kg zu wiegen, wenn das sp. G. des Ahorns = 0,76 ist? Weite und Höhe = 21cm. — A. 284. Was wog in Baden ein Sandstein von 5′ Länge, 2′ Breite und 3′ Höhe; $P = 5 . 2 . 3 . 54 . 2{,}45 = 3966$ ℔ — A. 285. Was wog in Preußen ein gußeiserner Dampfcylinder ohne Boden und Deckel von 5′ Höhe, 2′ lichter Weite und 3″ Metalldicke? $P = 3932{,}8$ ℔.

3. Molekularwirkungen der Flüssigkeiten.

170 **Die Flüssigkeitshaut.** Die Flüssigkeitshaut ist die äußerste Oberflächenschicht einer Flüssigkeit; dieselbe besitzt eine größere Cohäsion als die Flüssigkeit im Inneren. Denn im Inneren wird jedes Theilchen der Flüssigkeit von allen Seiten gleich stark angezogen; diese gleichen Anziehungen müssen sich einander aufheben. An der Oberfläche aber befinden sich über einem gewissen Theilchen nur wenige oder keine Moleküle der Flüssigkeit, dagegen viele ringsum nach allen Seiten hin, und sehr viele unter demselben. Die Anziehungen nach den Seiten hin heben sich ebenfalls auf; die Anziehungen nach oben abgerechnet, bleiben noch viele nach unten ziehende Kräfte übrig, welche eine auf der Oberfläche senkrechte Resultante haben. Vermöge derselben üben demnach die Oberflächentheilchen einen Druck auf das Innere der Flüssigkeit aus wie eine über dieselbe gespannte Haut. Diese Oberflächenspannung ist um so größer, je mehr Cohäsion die Flüssigkeit überhaupt besitzt, je zäher dieselbe also ist. Sie ist für eine convexe Oberfläche größer als für eine ebene, weil in der ersteren weniger nach oben ziehende Theilchen vorhanden sind; aus ähnlichem Grunde ist sie in einer convexen Oberfläche um so größer, je stärker dieselbe gekrümmt ist, und ist in einer concaven Oberfläche kleiner als in einer ebenen, und zwar um so kleiner, je stärker die concave Krümmung ist. Sie besitzt nur dann rings um eine flüssige Masse herum gleiche Größe, wenn die Krümmung überall dieselbe ist, wenn also die Oberfläche Kugelform hat.

Die Flüssigkeitshaut wird nachgewiesen durch auf Wasser zu legende, gebrauchte Nähnadeln, welche eine leichte Einbiegung der Oberfläche veranlassen, wie auf einer feinen Haut, durch Wasserinsecten, die unbenetzt über die Flüssigkeit hinlaufen. Sie kommt zur Wirkung bei Seifenblasen, die sich vermöge der Oberflächenspannung zusammenziehen, und vermöge derselben ihre Kugelform haben, bei den Luftblasen in Flüssigkeiten, bei der Bildung von Tropfen, besonders von hängenden Tropfen, bei Flüssigkeiten, die in größerer Menge an festen Körpern vermöge der Adhäsion zu denselben hängen, wie bei den Plateau'schen Figuren. Dieselben erhält man, wenn man Drahtnetzkörper eintaucht in die Plateau'sche Flüssigkeit, aus 2 Maß Glycerin und 3 Maß Seifenbrühe bestehend, oder in die Böttcher'sche Flüssigkeit (2 Theile fein geschabte Palmölseife in 30 Theilen destillirten Wassers heftig umgerührt und mit $^1/_8$ bis $^1/_{10}$ der Mischung Glycerin versetzt). Daß die Oberflächenspannung mit der Form sich ändert, zeigt man mit einer Knieröhre, in deren längeren Schenkel man langsam Wasser gießt; zuerst zeigt sich an der Oeffnung des kürzeren Schenkels eine concave, dann eine ebene und endlich eine convexe Oberfläche. Die Flüssigkeitshaut kommt besonders zur Wirkung bei der Capillarität.

171 **Die Capillarität.** Die Lehre von der Capillarität umfaßt die Erscheinungen, welche bei dem Zusammenwirken der Oberflächen fester und flüssiger Körper stattfinden. Diese Erscheinungen sind verschieden, je nachdem die Adhäsion der Flüssigkeit (s. 76.) gegen den festen Körper größer oder kleiner ist als die Cohäsion der Flüssigkeit.

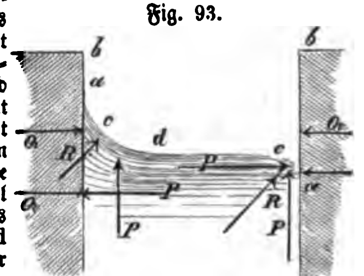
1. Ist die Adhäsion größer als die Cohäsion so finden folgende Erscheinungen statt:

a. Die Flüssigkeit bildet auf dem festen Körper keine Tropfen, sie zerfließt und benetzt ihn. Beispiele: Wasser auf Glas, Quecksilber auf Zinn oder Zink.

b. Die Flüssigkeit zieht sich an dem eingetauchten festen Körper oder an der Gefäßwand, die aus dem festen Körper besteht, in einer concaven Curve aus der freien Oberfläche hinaus.

Denn auf einen Flüssigkeitstheil an der Wand (Fig. 93 links) wirkt nach unten die Cohäsion P, senkrecht gegen die Wand hin aber die Adhäsion Q des Wandtheiles über, und des Theiles unter der Oberfläche und senkrecht von der Wand weg ebenfalls die Cohäsion P; die letztere Kraft wird von dem unteren Q aufgehoben, hebt aber dieses, da $Q > P$, nicht auf; es bleibt somit ein Rest von dem unteren Q, der mit dem oberen Q und dem senkrecht nach unten gerichteten P eine Resultante R hat, die schief in die Wand hineingerichtet ist. Die Oberfläche einer Flüssigkeit aber muß auf der dieselbe bildenden Kraft senkrecht stehen; folglich ist die Oberfläche schief nach unten von der Wand ab gerichtet, schließt mit der Wandfläche über der Flüssigkeit einen Winkel bac, Randwinkel genannt, ein, der z. B. für Wasser gegen Glas 150—180° beträgt. Für weiter nach innen, nach d zu, gelegene Wassertheile wird die Adhäsion immer kleiner; deßhalb muß die Resultante immer mehr der Richtung senkrecht nach unten näher kommen, die Oberfläche muß immer mehr wagrecht, ihr Winkel immer kleiner, bis zu 90° werden. Hieraus erklärt sich die concave Form der Randflüssigkeit. Mit dieser concaven Form ist auch ein Hinausziehen, also ein Heben der Flüssigkeit verbunden. Während nach älteren Forschungen die Menge der Flüssigkeit, welche an einer Längeneinheit der Contactlinie gehoben wird, der sogenannte Capillaritätscoëfficient, zwar für verschiedene Flüssigkeiten verschieden, für eine und dieselbe Flüssigkeit aber constant sein sollte, haben neuere Forschungen von Wilhelmy (1863) ergeben, daß das gehobene Volumen von der chemischen Beschaffenheit, ja von der Gestalt der festen Wand und der Temperatur abhängt. (S. Schluß von 171).

Fig. 93.



c. Die Oberfläche der Flüssigkeit in einer engen Röhre ist concav, bildet einen concaven Meniskus (μηνίσκος ein kleiner Mond).

d. In einer eingetauchten sehr engen (Haar- oder Capillar-) Röhre steht die Flüssigkeit höher als außerhalb derselben.

Denn innerhalb des Röhrchens wäre (nach 170.) wegen der concaven Oberfläche der Druck nach unten geringer als außerhalb desselben, wenn die Höhe der Flüssigkeit beiderseits dieselbe wäre; damit die Gleichheit des Druckes hergestellt werde, muß die Flüssigkeit

in dem Röhrchen so hoch steigen, bis das Gewicht der gestiegenen Flüssigkeit dem fehlenden Drucke gleich ist. Die Concavität des Meniskus ist nun aber um so stärker, je enger das Röhrchen ist; und je stärker die Concavität ist, um so größer wird der fehlende Druck; je größer aber dieser ist, desto höher muß die Flüssigkeit steigen. Folglich muß die Flüssigkeit in einem Capillargefäße um so höher stehen, je enger dasselbe ist. Eine genauere theoretische Untersuchung von Laplace (1819) ergab, was schon im 17. Jahrhundert der Jesuit Fabry beobachtet hatte, und was Gay-Lussac durch genaue Messungen mit dem Kathetometer bestätigt fand, daß in cylindrischen Röhren die Höhen sich umgekehrt wie die Durchmesser verhalten. Wenn also z. B. in einer Röhre von 1mm Weite Wasser 30mm, Weingeist 12mm, Terpentinöl 13mm hoch steht, so stehen diese Flüssigkeiten in Röhren von 0,1mm Weite bezüglich 300, 120 und 130mm hoch. Weiter fanden Laplace und Gay Lussac, daß zwischen parallelen Wänden die Flüssigkeit nur halb so hoch steht wie in cylindrischen Röhren von gleicher Weite, daß zwischen zwei gegen einander geneigten Wänden die Oberfläche in Hyperbelform ansteigt, sowie daß in einer aus Flüssigkeit herausgezogenen Röhre eine doppelt so hohe Flüssigkeitsäule hängen bleibt, als sie in einem eingetauchten Haarröhrchen steht. Diese letztere Thatsache zeigt besonders deutlich, daß die Adhäsion wohl die Grundursache, aber für sich nicht ausreichend zur Erklärung der Capillar-Erscheinungen ist; denn jene Thatsache erklärt sich nur durch den convexen Meniskus an der unteren Oeffnung des Röhrchens, welcher nach 170. einen Druck nach oben ausübt, der um eben soviel über demjenigen der ebenen Haut steht, als dieser über dem Drucke des ganz gleichen concaven Meniskus am oberen Ende des gehobenen Wassersäulchens. Man nennt die Eigenschaft sehr enger Gefäße, mittels der Flüssigkeitshaut Flüssigkeiten zu heben, die Haarröhrchenanziehung oder Capillar-Attraction.

Die Capillar-Attraction erklärt: das Aufsteigen z. B. von Kaffee in einem nur mit der Spitze eingetauchten Stückchen Zucker, das Aufsteigen von Feuchtigkeit im Boden, in feucht liegenden Sandhaufen, in feucht stehenden Mauern (Mauersalpeter), das Eindringen von Flüssigkeiten in poröse Gegenstände, das Sickern durch poröse Wände (Thonzellen, Alkarazzas, Drainröhren), das Aufsaugen von Flüssigkeiten durch Schwämme, Fließpapiere, Tücher, Humus, durch die menschliche Haut (Nutzen der Bäder), die Endosmose und das Aufsteigen von Pflanzensaft in den Saftgefäßen, wie die Bewegung von thierischen Flüssigkeiten. Man benutzt die Capillarität in den Lampendochten, in welchen sich die Brennflüssigkeit durch diese Kraft hebt, zum Sprengen von Felsen mittels befeuchteter Keile, zum Krümmen von Hölzern mittels Wasser einer- und Feuer andererseits, zum Aufsaugen von Lymphe mittels dünner Röhrchen, zum Sprengen von Schädeln mittels angefeuchteter Erbsen, zum Anschwellen und dadurch zum Verkürzen von Tüchern und Seilen (der Obelisk von Luxor), zur Herstellung verlechter Holzgefäße mittels eingegossenen Wassers, zu der Spielerei, Wasser ohne Gießen und Fließen aus einem Gefäß in ein anderes zu befördern mittels Faserbündel, die aus dem Wasser in das andere Gefäß hineingehen u. s. w.

e. Ein Tropfen in einem kegelförmigen Haarröhrchen oder zwischen zwei geneigten Platten bewegt sich nach den inneren Raumtheilen hin; denn der weitere Meniskus hat weniger Krümmung als der engere, übt daher einen größeren Druck als dieser aus.

f. Leicht schwimmende Gegenstände z. B. Kugeln, oder an Fäden aufgehängte und in Flüssigkeit tauchende Platten bewegen sich zu einander, wenn sie nahe zusammenkommen.

g. Fließt eine Flüssigkeit unter spitzem Winkel aus einem Gefäße, so läuft sie leicht an der Wand herab; man kann abhelfen durch Befetten oder ein Ausflußstäbchen.

Als Ergänzung zu a. ist zu bemerken, daß auch eine adhärirende Flüssigkeit Tropfen bildet, wenn sie an der Unterfläche des festen Körpers hängt und in so großer Menge vorhanden ist, daß ihr Gewicht ihre Cohäsion und die Oberflächenspannung überwiegt. Sehr gründlich wurde diese Tropfenbildung untersucht von Guthrie 1665. Derselbe fand das Gewicht der Tropfen um so größer, je kleiner die Bildungszeit derselben, je weniger gekrümmt die Unterfläche des festen Körpers und je höher die Temperatur der Tropfen ist; auch ergab sich, daß das Tropfengewicht abhängt von der Adhäsion des festen Körpers und der Tropfen, und zwar, daß es dem Capillaritätscoëfficient proportional ist, und endlich, daß die Tropfengröße durch die Art der Cohäsion der Flüssigkeit bedingt ist; sie ist direct proportional der Steifigkeit und indirect der Festigkeit. Ja sogar die Beschaffenheit der Luft soll auf die Tropfen Einfluß haben.

Die Capillarität ist eine Stelle der Wissenschaft, von welcher aus man in das Geheimniß der Molekularkräfte einzudringen hofft; darum ist sie vielfach theoretisch und experimentell erforscht worden. Wichtig sind hierbei die Capillaritätsconstanten, nämlich der Randwinkel und der Capillaritätscoëfficient α; der letztere gibt nicht nur an, wieviele Milligramme einer Flüssigkeit unter einem Millimeter der obersten Grenzlinie der gehobenen Flüssigkeit, der Contactlinie hängen, steht also nicht nur im Zusammenhange mit dem Gewichte der Guthrie'schen Tropfen und mit den Dimensionen von Luftblasen,

die unter einer festen Oberfläche in einer berührenden Flüssigkeit schweben, sondern auch mit der Steighöhe in Capillarröhren, da nach der Theorie der Quotient des doppelten Capillaritätscoëfficienten durch die Dichte der Flüssigkeit gleich dem Product der um ein Drittel des Radius vermehrten Steighöhe mit dem Radius ist, sowie endlich auch mit der Oberflächenspannung und der Cohäsion der Flüssigkeit, da ebenfalls nach der Theorie dieser Coëfficient gleich der halben Oberflächenspannung in 1^{qmm} einer Kugelfläche vom Radius 1 ist, und da deßhalb der doppelte Coëfficient dividirt mit dem Radius die Oberflächenspannung in jeder flüssigen Kugel angibt. Wegen dieses vielseitigen Auftretens hat man auch den Coëfficient auf verschiedene Art bestimmt, aus dem Gewichte hängender Tropfen, den Dimensionen hängender Blasen, der Steighöhe in Capillarröhren. Eine ergebnißreiche Bestimmungsart hat Wilhelmy (1863) angewendet: er hing Tafeln oder Cylinder an dem einen Arme einer feinen Wage auf, ließ sie bis zu einer bestimmten Höhe in Flüssigkeit tauchen und bestimmte dann genau ihr Gewicht; dasselbe mußte sein gleich dem Gewichte in der Luft, vermindert um den Gewichtsverlust und vermehrt um das Gewicht $\alpha\lambda$ der adhärirenden Flüssigkeit, wobei λ den Umfang des Körpers im Niveau bedeutet. Nach diesen verschiedenen Methoden ergaben sich übereinstimmende Werthe für den Coëfficient, so für Wasser 7,5, Schwefelkohlenstoff 3,3, Steinöl 2,3, Alkohol 2,2, Aether 1,8. Zahlreiche Bestimmungen für geschmolzene Metalle und Salze hat Quincke (1863) vorgenommen und aus denselben interessante Schlüsse über die specifische Cohäsion, d. i. den Quotient der Oberflächenspannung durch die Dichte, gezogen; die specifische Cohäsion ist nämlich meist ein einfaches Vielfaches von 4,3, so bei Wasser 4 . 4, 3, bei Quecksilber 2 . 4, 3. Eine ausgedehnte Anwendung gewinnen die Coëfficienten in Quinckes (1869) Untersuchung der Erscheinungen beim Zusammentreffen zweier oder mehrerer Flüssigkeiten; so haben 2 Flüssigkeiten gegen einander den Coëfficient α_{12}, der jedoch nicht aus α_1 und α_2 berechnet werden, sondern alle Werthe zwischen 0 und $\alpha_1 - \alpha_2$ haben kann; ist er $= 0$, so sind die Flüssigkeiten in allen Verhältnissen mischbar; ist er kleiner als $\alpha_1 - \alpha_2$, so breitet sich die 2te Flüssigkeit auf der ersteren aus. Diese Forschungen bilden wohl den Beginn der Erklärung von vielem Unbekannten.

Bei seinen schon erwähnten Untersuchungen fand Wilhelmy auch, daß an einem eingetauchten Körper ein größeres Gewicht von Flüssigkeit hängen bleibt, als man nach den Dimensionen der flüssigen Schicht berechnen könnte, daß also die adhärirende Flüssigkeit sich in einem verdichteten Zustande befinden müsse. Er nannte die an der Einheit der Oberfläche verdichtete Flüssigkeitsmenge den Verdichtungscoëfficient (β) und bestimmte diesen durch Eintauchversuche; derselbe fand sich verschieden bei einer Flüssigkeit gegen verschiedene feste Oberflächen und ebenso verschieden bei verschiedenen Flüssigkeiten gegen einen und denselben festen Körper. Aehnliches fand Wilhelmy für den Capillaritätscoëfficient; dieser ist ebenfalls nicht blos veränderlich mit der Flüssigkeit und dem festen Körper, sondern auch mit der Temperatur, ja sogar mit der Gestalt des festen Körpers z. B. mit dem Radius des eingetauchten Cylinders. Aus diesen feinen Beobachtungen Wilhelmys folgt, daß die Molekularkräfte nicht, wie die ältere Theorie der Capillarität annahm, nur auf unendlich geringe Entfernungen wirken, sondern daß der Radius ihrer Wirkungssphäre eine endliche, bestimmbare Größe habe. Diesen Radius aufzufinden, ist eine für die moderne Physik wichtige Aufgabe. Plateau (1860) hatte schon durch Rechnung und Versuche gezeigt, daß die Dicke einer Seifenblasenhaut wenigstens gleich dem doppelten Radius der Wirkungssphäre sein müsse: da man nun aus optischen Versuchen die Dicke dieser Haut finden kann, so erhielt Plateau als obere Grenze für den Radius der Wirkungssphäre die Zahl $0{,}0\,000\,567^{mm}$. Quincke suchte (1868) den Radius direct zu bestimmen; er brachte auf einer Glasplatte eine sehr dünne, aber allmälig dicker werdende, also keilförmige Silberschicht an und tauchte die Glasplatte in Flüssigkeit so weit, daß sie zuerst nur das Glas benetzte, dann die Silberschicht an ihrer dünnsten Stelle und so weiter an immer dickeren Stellen; für alle Stellen maß er den Randwinkel; anfänglich war derselbe nur von Glas, an der zweiten Stelle von Glas und Silber abhängig, an den folgenden Stellen immer mehr vom Silber und immer weniger vom Glas. Wäre der Radius der Wirkungssphäre unendlich klein, so müßte der Randwinkel sich nur beim Uebergange von der ersten zur zweiten Stelle geändert haben und dann constant geblieben sein; er änderte sich aber bei noch mehreren folgenden Stellen und gab hierdurch zu erkennen, daß das Glas durch das Silber hindurch noch eine molekulare Wirkung äußere. Erst da, wo der Randwinkel constant wurde, hörte die Wirkung des Glases auf, d. i. an einer Stelle, wo die Dicke der Silberschicht den Radius der Wirkungssphäre des Glases übertraf. Hieraus ergab sich, daß der Radius der Wirkungssphäre der Molekularkräfte des Glases $0{,}000\,054^{mm}$ beträgt, etwa das 10fache einer Wellenlänge des Lichtes.

2. Ist die Adhäsion der Flüssigkeit gegen den festen Körper kleiner als die Cohäsion der Flüssigkeit, so finden folgende Erscheinungen statt: 172

a. Die Flüssigkeit bildet auf dem festen Körper Tropfen, zerfließt nicht auf demselben und benetzt ihn nicht. Beispiele: Wasser auf befettetem oder bestäubtem Glase, Quecksilber auf Glas, Holz, Eisen; ein mit Hexenmehl bestäubter Finger kann aus Wasser eine Münze nehmen, ohne naß zu werden.

b. Die Flüssigkeit zieht sich an dem eingetauchten festen Körper oder an der Gefäßwand in einer convexen Curve unter die Oberfläche zurück.

Denn hier sind (Fig. 93 rechts) die von der Wand abziehende und die zur Oberfläche senkrechte Kraft P größer als die nach der Wand hin wirkenden parallelen Kräfte Q; sind sie so groß, daß die beiden Q ganz aufgehoben werden, so bilden sie eine Resultante R schief von der Wand ab in die Flüssigkeit hineingerichtet; daher muß der an der Wand befindliche Oberflächentheil, der auf dieser Resultante senkrecht stehen muß, sich schief nach unten gegen die Wand richten. Demnach wird hier der Randwinkel b a c ein spitzer, beträgt, z. B. für Quecksilber gegen Glas 55°. Vom Scheitel dieses Winkels nach c hin wird die senkrechte Cohäsion immer größer, also die Oberfläche immer mehr wagrecht; daher muß sich die Flüssigkeit in einer convexen Curve vom Scheitel nach der wagrechten Oberfläche hin ziehen.

c. Die Oberfläche der Flüssigkeit in einer engen Röhre ist ein convexer Meniskus.

d. In einer eingetauchten sehr engen (Haar- oder Capillar-) Röhre steht die Flüssigkeit niedriger als außerhalb derselben.

Denn innerhalb des Röhrchens wäre (nach 170.) wegen der convexen Oberfläche der Druck nach unten größer als außerhalb desselben, wenn die Höhe der Flüssigkeit beiderseits dieselbe wäre; damit die Gleichheit des Druckes vorhanden sei, muß demnach die Flüssigkeit in dem Röhrchen so tief stehen, daß der Druck des Meniskus und des Säulchens zusammen dem äußeren Drucke der ebenen Haut und der Flüssigkeit zusammen gleich seien. Diese Eigenschaft der Haargefäße nennt man Haarröhrchen-Abstoßung oder Capillar-Depression, dieselbe ist weniger wichtig als die Capillar-Attraction.

e. Ein Tropfen in einem kegelförmigen Haarröhrchen oder zwischen zwei geneigten Platten bewegt sich nach den weiteren Theilen hin; denn der engere Meniskus ist convexer als der weitere, übt daher einen größeren Druck als dieser aus.

f. Leichte oder an Fäden hängende Gegenstände bewegen sich auch hier zu einander; wird aber ein Gegenstand benetzt und der andere nicht, so gehen sie aus einander.

g. Fließt die Flüssigkeit unter noch so spitzem Winkel aus einem Gefäße, so rinnt sie doch nie an der Wand herab.

173 **Die Diffusion der Flüssigkeiten.** Wenn zwei Flüssigkeiten einander berühren, deren Adhäsion gegen einander geringer ist als ihre Cohäsion, so vermischen dieselben sich nicht, sondern ordnen sich nach ihrem spec. G. über einander (die Elementarwelt). Ist aber die Adhäsion der Flüssigkeiten gegen einander größer als die Cohäsion, so vermischen sie sich, sie durchdringen sich oder diffundiren in einander; auch wenn die leichtere Flüssigkeit mit Vorsicht auf die schwerere gegossen wird, so findet diese Diffusion statt, die leichtere Flüssigkeit geht gegen das Gesetz des Auftriebes in die schwerere hinab, die schwerere steigt in die leichtere hinauf, so lange bis die beiden Flüssigkeiten gleichförmig gemischt sind. In je kürzerer Zeit diese gleichförmige Mischung vollbracht ist, desto größer ist die Diffusionsgeschwindigkeit. So diffundirt nach Graham Salzsäure in Wasser 2,33mal so schnell als Kochsalzlösung, 7mal so schnell als Zuckerlösung, aber 99mal so schnell als Caramel. Ebenso langsam als Caramel diffundiren Leim, Gummi, Kieselsäure, Aluminiumhydroxyd oder Thonerdehydrat, überhaupt alle Kolloide, während die Krystalloide schnell diffundiren. Man kann diesen Unterschied benutzen, um eine Mischung von Kolloiden und Krystalloiden zu scheiden; gießt man auf eine solche Mischung vorsichtig Wasser, so steigen die Krystalloide in das Wasser hinauf, während die Kolloide unten zurück bleiben. Noch vollständiger geschieht diese Scheidung, wenn man zwischen die Mischung und das Wasser eine Kolloidhaut, z. B. vegetabilisches Pergament (in Schwefelsäure getauchtes Papier) bringt; durch eine

solche Haut diffundiren nur die Krystalloide, während die Kolloide vollständig zurückbleiben. Graham nennt diese Methode der Scheidung Dialyse und die Kolloidhaut den Dialysator.

Fick fand 1855 die Diffusionsconstante d. i. diejenige Menge des gelösten Körpers, welche in 1 Tage durch 1qcm in einem Gefäße von 1cm Höhe, in welchem der Concentrationsunterschied 1g beträgt, diffundirt, für Kochsalz bei 16° = 0,888 und mit der Temperatur wachsend, was auch schon Graham beobachtet hatte. Beilstein untersuchte zu derselben Zeit eine Reihe anderer Salzlösungen, ebenso Simler und Wild 1857, welche eine optische Untersuchungsmethode angaben. Nach solchen Methoden sind die neuesten Versuche von Hoppe und von Voit (1867) angestellt. Der letztere fand die Diffusionsconstante des Rohrzuckers = 0,3144, die des Traubenzuckers = 0,3180, und schloß aus seinen Versuchen, daß die Diffusion dieser Stoffe der Concentrationsdifferenz, der Größe der Berührungsfläche und der Zeit proportional sei. Die Diffusion der Flüssigkeiten erklärt sich dadurch, daß immer ein Theil der Moleküle in fortschreitender Bewegung begriffen ist und daher in die molekularen Zwischenräume einer anderen, berührenden Flüssigkeit eindringen kann. Die geringe Diffusion der Kolloide zeigt, ihrer zähen Beschaffenheit analog, daß ihre Moleküle mehr in schwingender Bewegung sind.

174 **Die Endosmose** (Parrot 1811, Fischer 1812). Wenn zwei Flüssigkeiten durch eine Scheidewand getrennt sind, die viele Haarröhrchen oder auch viele Poren enthält, welche mit einander Haarröhrchen bilden, so müssen diese Haarröhrchen von beiden Flüssigkeiten eine gewisse, im Allgemeinen verschiedene Menge einsaugen, welche Mengen sich durch Diffusion mit einander vermischen. Diese Mischung steht nun mit beiden Flüssigkeiten in Berührung und muß daher in beide diffundiren, und zwar mit verschiedener Geschwindigkeit, also nach einer gewissen Zeit in verschiedener Menge. Durch eine capillare Scheidewand zweier Flüssigkeiten gehen also verschiedene Mengen derselben. Man nennt diese Eigenthümlichkeit solcher Scheidewände die Endosmose (ἔνδον hinein und ὠσμός, Stoß). Am besten zeigen diese Erscheinungen thierische Häute (Blase, Herzbeutel, Hornhaut) und Pflanzenmembranen, welche Häute indeß gegen gleiche Flüssigkeiten ein verschiedenes Verhalten zeigen. Trennt man z. B. Wasser und Weingeist durch Blase, so vermehrt sich der Weingeist, trennt man sie durch Kautschuk, so steigt das Wasser; aber in beiden Fällen findet sich nach dem Versuche beiderseits eine Mischung beider Flüssigkeiten.

Zur Untersuchung der durchgehenden Mengen construirte Dutrochet (1826) sein Endosmometer, eine getheilte, unten trichterförmig sich erweiternde Röhre, die unten mit einer Membran geschlossen ist. In dieselbe wird die eine Flüssigkeit, z. B. Kupfervitriollösung gefüllt, und dann wird das untere Ende in die andere Flüssigkeit getaucht. Bald steigt die Flüssigkeit in der Röhre, während an der blauen Farbe des Wassers erkannt wird, daß auch Vitriollösung nach unten gegangen ist. Solche Untersuchungen ergaben, daß die durchgehenden Wassermengen der Dichte der anderen Flüssigkeit proportional sind. Doch ist Dutrochets Methode ungenau, da z. B. bei gleich starker Endosmose beider Flüssigkeiten kein Steigen bemerkt werden kann. Genauer sind Jollys Untersuchungen (1849), der eine gewogene Menge des zu untersuchenden Körpers in sein Endosmometer füllte und dieses so lange in frisches Wasser tauchte, bis der Körper ganz verschwunden und durch Wasser ersetzt war. Die für 1g des geprüften Körpers eintretende Wassermenge nannte Jolly das endosmotische Aequivalent. Bei Benutzung von Schweinsblase fand er dasselbe für Alkohol und Kochsalz = 4, Zucker = 7, für Glaubersalz, Kaliumsulfat und Bittersalz = 12, für Kali = 230. Da indessen die durchgehende Wassermenge von der Dichte der anderen Flüssigkeit abhängt, und da diese bei Jollys Methode immer geringer wird, so hat Eckhard (1868) in das Endosmometer eine größere Menge des zu prüfenden Körpers zusammen mit einer gesättigten Lösung desselben Körpers gebracht, dasselbe in immer frisches Wasser getaucht und endlich gemessen, welche Wassermenge für die ausgetretene Stoffmenge eingetreten war, und zwar zu einer Zeit, wo das Endosmometer noch ungelösten Stoff enthielt. Nach dieser Methode konnte Eckhard auch den Begriff des endosmotischen Aequivalentes schärfer präcisiren. Es ist diejenige Gewichtsmenge Wasser in Grammen, welche gegen 1g eines löslichen Körpers durch eine capillare Scheidewand ausgetauscht wird, vorausgesetzt, daß während des Vorganges die Flüssigkeiten zu beiden Seiten der Scheidewand ihre Beschaffenheit unverändert beibehalten. Dieses endosmotische Aequivalent ist nach

Eckhard unabhängig von der Temperatur und dem Drucke der Flüssigkeiten, sowie von der Richtung der Diffusion, dagegen abhängig von der materiellen Beschaffenheit der Membran und der Flüssigkeiten, und, wie Dutrochet zeigte, im Allgemeinen mit der Dichte oder Concentration der Lösung zunehmend; die Geschwindigkeit der Endosmose erschien zwar ebenfalls unabhängig von der Richtung der Diffusion, aber wachsend mit der Temperatur. — Dutrochet gebrauchte anfänglich den Ausdruck Endosmose für die stärker strömende Flüssigkeit und für die schwächer strömende die Bezeichnung Exosmose; jetzt verbreiten sich die Bezeichnungen Diosmose oder kurzweg Osmose für die ganze Erscheinung mehr und mehr.

Die Endosmose erklärt das Eindringen des Regens in Früchte (z. B. Traubenbeeren) und Blätter und daher die rasch erfrischende Wirkung desselben; das Ansangen des Pflanzensaftes durch die Wurzelspitzen und daher durch die Fortdauer dieses Ansaugens das Steigen des Saftes in den Gefäßen der Pflanzen; die Aufsaugung des Milchsaftes oder Chylus mittels der Milchsaftgefäße aus dem Dünndarme und die Bereitung aller Ernährungsflüssigkeiten, wie der Lymphe, der Galle, des Speichels u. s. w. aus dem Blute.

4. Bewegungen der Flüssigkeiten.

175 **Ausfluß aus Gefäßen.** Wenn eine Flüssigkeit aus einer Boden- oder Seitenöffnung eines Gefäßes fließt, so bieten sich hauptsächlich drei Fragen zur Untersuchung dar: die Geschwindigkeit des Ausflusses aus der Oeffnung, die Ausflußmenge in einer gewissen Zeit und die Eigenschaften des Ausflußstrahles.

1. Die Ausflußgeschwindigkeit; Torricellis Theorem (1644). **Die Geschwindigkeit des Ausflusses an der Oeffnung ist gleich der Geschwindigkeit eines Körpers, der frei und senkrecht die Höhe von dem Wasserspiegel bis zur Oeffnung herabgefallen ist.** Dieses schon von Torricelli durch Beobachtung gefundene, aber nicht bewiesene Gesetz läßt sich auf folgende Art beweisen: Es sei h' die Höhe einer unendlich dünnen Wasserschicht direct über der Oeffnung q, und g' die uns noch unbekannte Beschleunigung, welche diese Schicht durch die auf sie einwirkende Kraft k erfährt; dann ist nach Formel (20) (§. 127. 7) die Fallgeschwindigkeit dieser Schicht $v = \sqrt{(2g'h')}$. Die Kraft k, welche die Acceleration g' erzeugt, ist aber der auf die Schicht ausgeübte Druck, welcher durch qhp gemessen wird, wenn h die ganze Höhe des Wassers über der Oeffnung q, die sogenannte Druckhöhe bedeutet, und wenn p das Gewicht der Cubikeinheit Wasser ist; die durch diese Kraft k niedergedrückte Wassermasse der genannten Schicht ist nach Formel (5) (§. 19.) $m = qh'p : g$, worin g die bekannte Acceleration der Erdschwere bezeichnet. Wenn man aber eine bewegende Kraft und die durch dieselbe bewegte Masse kennt, so kann man nach Formel (8) (§. 24.) die erzeugte Acceleration finden; dieselbe ist $g' = k : m = qhp : (qh'p : g) = g \,.\, (h : h')$. Setzen wir diesen Werth für g' in den für v ein, so ergibt sich leicht $v = \sqrt{(2gh)}$, womit Torricellis Gesetz bewiesen ist.

Dasselbe gilt nur dann, wenn die drückende Kraft dieselbe bleibt, wenn also der Wasserspiegel seine Höhe nicht ändert; dies ist annähernd der Fall, wenn das Gefäß sehr groß und die Ausflußöffnung sehr klein ist. Mit einem solchen Gefäße oder auch mit einer Mariotte'schen Flasche (§. 201.) läßt sich denn auch die Richtigkeit des Gesetzes nachweisen. Man vergleiche nämlich die aus mehreren gleichen Oeffnungen in verschiedener Höhe des Gefäßes, aber in gleicher Zeit geflossenen Wassermengen, oder auch die aus einer Oeffnung bei verschiedenem Wasserstande geflossenen Quantitäten, so wird man finden, daß dieselben sich direct verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Druckhöhen. Da aber die Ausflußmengen für gleiche Zeiten und gleiche Oeffnungen den Geschwindigkeiten proportional sind, so müssen die Geschwindigkeiten sich ebenfalls wie die Wurzeln aus den Druckhöhen verhalten, was dem Theorem von Torricelli gemäß ist. Dieses Theorem lehrt nebenbei, daß die Ausflußgeschwindigkeit nicht von der Natur der Flüssigkeit und nicht von der Form der Oeffnung abhängt. Auch folgt aus demselben, daß ein Wasserstrahl, der aus einer nach oben gerichteten Oeffnung eines Seitenarmes eines Gefäßes springt, theoretisch betrachtet bis zu der Höhe des Wasserspiegels steigen muß; denn ein steigender

Körper erreicht nach 130. dieselbe Höhe, welche er durchfallen muß, um die Steiggeschwindigkeit zu erreichen. In Wirklichkeit steigt ein Springbrunnen nicht so hoch, als das Wasser in dem Speisereservoir steht, weil ein Theil der Steigkraft durch die Reibung, den Widerstand der Luft und die zurückfallenden Wassermassen verzehrt wird; um wenigstens den letzten Einfluß zu vermindern, läßt man Springbrunnen etwas schief aufsteigen, was schon bei einer schief geschnittenen Ausflußöffnung stattfindet (Adhäsion). — Ueberhaupt haben Ausflußöffnungen und Röhrenwände starke Einwirkungen auf die Ausflußerscheinungen; so fanden Hagen (1839) und Poiseuille (1843), daß die Ausflußgeschwindigkeiten aus capillaren Ansatzröhren sich wie die Druckhöhen selbst, und nicht wie die Wurzeln aus denselben verhalten, eine merkwürdige Abweichung von Torricellis Theorem. Hagen (1869) und O. E. Meyer (1873) zeigten, daß Poiseuilles Gesetz auch für Röhren von großem Durchmesser gilt, wenn dieselben nur hinreichend lang sind.

176 2. Die Ausflußmenge. Die in einer Secunde ausfließende Wassermenge hat ein Volumen gleich dem Product der Ausflußöffnung mit der Ausflußgeschwindigkeit. Denn in 1 Sec. fließt eine Wassersäule aus, deren Grundfläche gleich der Oeffnung ist, und deren Höhe dem Wege gleich kommt, den das zuerst ausfließende Wassertheilchen in 1 Sec. zurücklegt, welcher Weg bekanntlich durch die Geschwindigkeit gegeben ist; es ist also die Ausflußmenge in t Sec. $= t \cdot q \cdot \sqrt{(2gh)}$.

Indessen zeigen die einfachsten Versuche, daß in den meisten Fällen die wirkliche Ausflußmenge dieser berechneten oder theoretischen nicht gleich, sondern meistens kleiner als dieselbe ist; der Grund dieser Erscheinung liegt in der Zusammenziehung oder Contraction des ausfließenden Strahles. Da nämlich die rings über der Oeffnung seitlich gelegenen Theilchen nach der Oeffnung hinströmen müssen, so haben sie nicht blos die Richtung senkrecht zur Fläche der Oeffnung, sondern auch eine Bewegung nach dem Mittelpunkte derselben; folglich ist die Oberfläche des Ausflußstrahles nicht senkrecht auf der Oeffnung sondern schief zusammenlaufend; der Strahl zieht sich sofort bei seinem Austritte zusammen, sein Volumen ist nicht das einer Säule, wie bei der Rechnung angenommen wurde, sondern kleiner. Es muß demnach die theoretische Ausflußmenge mit einem ächten Bruche multiplicirt werden, wenn sie der wirklichen gleich kommen soll; man nennt diesen ächten Bruch den Contractionscoëfficient; derselbe beträgt für eine Oeffnung in einer dünnen Wand etwa 0,6, ändert sich aber etwas nach Form und Größe der Oeffnung und mit dem Drucke; für eine Oeffnung in einer dicken Wand oder für eine gleich weite Ansatzröhre ist er = 0,8, für eine conisch sich verengernde Röhre 0,95, für eine wie der Strahl geformte Ansatzröhre = 1 und für eine sich conisch schwach erweiternde Ansatzröhre sogar größer als 1. Die Vergrößerung des Coëfficienten rührt von der Adhäsion der Oeffnungswände gegen die Flüssigkeit her; im letzten der angeführten Fälle reißt der Ausflußstrahl Luft ringsum mit fort, wodurch der Luftdruck auf die Flüssigkeit im Gefäße überwiegend wird und die Geschwindigkeit des Ausflusses vergrößert.

Tresca in Paris hat (seit 1864) auch feste Körper, wie Blei, Zinn, Silber, Eisen, Stahl, dann pulverige Körper, wie Sand, weiche plastische Körper, wie Thon, spröde Körper, wie Eis, mittels einer hydraulischen Presse sehr großen Druckkräften (bis zu 100,000kg) ausgesetzt und gefunden, daß dieselben alsdann ausfließen wie flüssige Körper; insbesondere zeigt die innere Bildung des Strahles die Eigenthümlichkeit, daß die ursprünglich horizontalen Trennungsflächen der einzelnen Schichten sich bald nach unten krümmen und zu verticalen Ringflächen werden, in denen sich die einzelnen Cylinderringe des Strahles einander berühren, wodurch obige Erklärung der Contraction bestätigt wird; auch zur Erklärung der Gletscherbewegung tragen Trescas Versuche bei. Endlich zeigen dieselben, daß auch feste Körper einen Druck überall hin fortpflanzen, wenn derselbe nur bedeutend genug ist.

177 3. Der Ausflußstrahl. Die Linie, welche der Strahl beschreibt, ist eine gerade, wenn der Ausfluß durch eine Bodenöffnung stattfindet; sie ist eine Parabel, wenn ein seitlicher Ausfluß oder Abfluß stattfindet, und diese Parabel ist um so flacher, je tiefer die Seitenöffnung unter dem Wasserspiegel liegt, oder je größer bei dem Abflusse von der Oberfläche die Geschwindigkeit des Wassers ist.

Hinsichtlich der Constitution des Ausflußstrahles sind das Gefüge und die Formwechsel desselben zu beachten. In Betreff des Gefüges unterscheidet man den continuirlichen Stamm, in welchem die Flüssigkeit noch vollkommen klar ist, und zwar deßhalb, weil durch kein Mittel eine Trennung in einzelne Theilchen wahrgenommen werden kann,

sodann den unklaren Theil, welcher uns zwar noch zusammenhängend erscheint, in welchem aber durch optische und akustische Versuche (Magnus 1859) eine Auflösung in Tropfen nachgewiesen werden kann, und welcher eben wegen dieser Auflösung, wie die Optik zeigt, unklar erscheinen muß, und endlich den in Tropfen aufgelösten Theil, das natürliche Tropfenwerfen, in welchem die Tropfen mit wachsendem Abstande von der Ausflußöffnung sich immer weiter von einander entfernen. Die letztere Erscheinung ist eine Folge des freien Falles, da die vorausgehenden Theile des aufgelösten Strahles wegen ihres längeren Fallens eine größere Geschwindigkeit besitzen und sich daher von den folgenden immer weiter entfernen; zwei um eine Secunde von einander entfernte Tropfen haben nach 1 Sec. einen Abstand von 15ᵐ, nach 10 Sec. von 105ᵐ. Man hat auch häufig die unsichtbare Auflösung im zweiten Theile der Fallwirkung zugeschrieben; allein einerseits wäre es denkbar, daß diese Wirkung sich in einer fortwährenden Abnahme der Strahldicke äußern könnte; dann hat Plateau (1856) gezeigt, daß ein Oelcylinder in der bekannten Mischung nur so lange seine Gestalt behält, als seine Höhe nicht viel mehr als das Dreifache seines Durchmessers beträgt, daß er aber bei weiterer Verlängerung zuerst Einschnürungen und Anschwellungen annimmt und sich endlich in Tropfen auflöst, daß also auch ohne Fallwirkung die Tropfenauflösung stattfindet; endlich hat Abendroth (1874) auch bei steigenden Strahlen dieselben drei Theile wahrgenommen, die an fallenden zu beobachten sind, und an dem unklaren Theile die Auflösung in Tropfen durch optische Mittel nachgewiesen. Diese kann hier ebenso wenig, wie das Tropfenwerfen, das in Gestalt von parabolischen Perlenregen auftritt, dem Fallen zugeschrieben werden. Fuchs hat schon (1856) die Adhäsion des ausfließenden Strahles durch den Rand der Oeffnung als die Ursache dieses Perlenregens erkannt. Die Auflösung im unklaren Theile wird hier von den Schwingungen hergeleitet, welche in den Wassertheilchen durch die Reibung der Strahlenoberfläche an der Ausflußröhre, sowie durch die Reibung der inneren, schneller bewegten Strahlentheile an den äußeren stattfinden müssen; unterstützt wird diese Erklärung dadurch, daß durch das Aufsetzen einer tönenden Stimmgabel auf das Gefäß die Auflösung befördert, der continuirliche Stamm verkürzt wird. Diese Schwingungen bringen schon in diesem Stamme seine Einschnürungen hervor, welche nach dem Plateau'schen Versuche mittels der Oberflächenspannung die Auflösung in Tropfen veranlassen. Bei den fallenden Strahlen werden die Schwingungen durch die seitlichen, die contractio venae bewirkenden Bewegungen noch verstärkt, und beim Ausflusse aus einer dünnen Wand zur höchsten Stärke dadurch ausgebildet, daß eine solche wegen ihrer Elasticität in starke Schwingungen versetzt werden kann. Darum treten hier außer den die Tropfenbildung bewirkenden feineren Einschnürungen und Anschwellungen noch größere Erscheinungen derselben Art auf, die zu den Formwechseln des Strahles gehören.

Die Formwechsel bestehen zunächst in den Knoten und Bäuchen, abwechselnden Verdünnungen und Verdickungen des Strahles, sowohl im unklaren, wie im aufgelösten Theile. An den Knoten sind nach Savart (1833), der diese Erscheinungen zuerst studirte, und nach Magnus die Tropfen länger als dick, ellipsoidisch, an den Bäuchen dicker als lang, sphäroidisch, während nach jedem größeren Tropfen ein kleinerer Trabant, von der inneren schnelleren Ader herrührend, zu beobachten ist. Daß die Knoten und Bäuche von den Schwingungen des Randes herrühren, zeigt die Thatsache des Verschwindens jener Formwechsel, wenn man die Schwingungen beseitigt, und das verstärkte Auftreten derselben, wenn die Schwingungen z. B. durch das Anstreichen eines Violoncells verstärkt werden. An ursprünglich cylindrischen Strahlen, die aus einer kreisförmigen Oeffnung fließen, zeigen sich nur die Formwechsel; hat aber der Strahl einen anderen als kreisförmigen Querschnitt, einen länglich elliptischen oder kantigen, so ist die Oberflächenspannung an den convexeren Stellen stärker, muß daher diesen Theil des Querschnitts nach innen, und durch diesen Druck die weniger convexen, ebenen oder concaven Stellen nach außen treiben, wodurch dieselben mehr convex und die ersteren weniger convex werden, und der Querschnitt in einiger Entfernung in der Stellung geradezu verwechselt erscheint. Die Kanten und Rippen eines Strahles ziehen sich nach innen, während neue Rippen an vorher zurückgezogenen Stellen hervortreten; hierdurch macht der Strahl den Eindruck spiraliger Rotationen und bewirkt mit den Knoten und Bäuchen zusammen ein lebhaftes Spiel abwechselnd bewegter Formen.

Sehr mannichfaltige Abflußformen entstehen, wenn Strahlen gegen feste Körper treffen; die Adhäsion verhindert alsdann das Zurückwerfen nach den Regeln der Elasticität und die flüssige Masse hängt durch ihre Cohäsion zusammen. Durch das Zusammenwirken der Adhäsion, Cohäsion und der lebendigen Kraft des Strahles entstehen je nach dem Vorwiegen einer dieser Kräfte allerlei schildförmige und zeltförmige Abflußfiguren, die in Gärten als Schmuck verwendet werden. Aehnliche Figuren bilden sich bei dem Zusammentreffen zweier Strahlen (Savart und Magnus).

178 **Das Fließen des Wassers in Röhren und Kanälen.** In Röhren und Kanälen bewegt sich das Wasser nur fort, wenn nach einer Richtung ein überwiegender Druck ausgeübt wird; sind solche Räume wagrecht oder ansteigend, so muß ein äußerer Druck auf das Wasser in denselben einwirken, wie z. B. der Druck einer Kraftmaschine oder der Druck einer Wassersäule, die mit der zu bewegenden Wassermasse in Verbindung steht. Dagegen in abwärts geneigten Räumen wird der Druck durch das Gewicht des Wassers selbst erzeugt; demnach wird in diesem Falle die Geschwindigkeit des herabfließenden Wassers berechnet, wie diejenige eines auf schiefer Ebene herabgefallenen Körpers. Abgesehen von den Hindernissen, ist daher die Geschwindigkeit, mit welcher Wasser am Fuße einer geneigten Fläche abfließt, gleich der Geschwindigkeit eines Körpers, der die gleiche Höhe, welche das Wasser schief durchfällt, senkrecht herabgefallen ist, also $v = \sqrt{2gh}$, wenn h diese senkrechte Höhe bedeutet.

Hiernach wäre die Geschwindigkeit des fließenden Wassers unabhängig von der Neigung der schiefen Fläche, auf welcher dasselbe herabfließt; dieses Resultat ist aber nur richtig, wenn die Hindernisse der Bewegung außer Acht gelassen werden. Indessen darf dies hier gerade am wenigsten geschehen, weil die Hindernisse sehr bedeutend sind. Das Haupthinderniß ist die Reibung des Wassers an seinem Bette; dieselbe ist offenbar um so größer, je länger das Bett ist, auf welchem das Wasser herabfließen muß, um die Höhe h zu durchfallen, je geringer also die Neigung der schiefen Ebene, oder wie man sich hier ausdrückt, das Gefälle ist. Man mißt das Gefälle durch den Sinus des Neigungswinkels oder durch einen Bruch, welcher angibt, um wie viel das Wasser fällt, wenn es um eine Längeneinheit fortfließt; so beträgt z. B. das Gefälle der Moldau zwischen Budweis und Prag 0,001, das des Mississippi im Mittel nur 0,00011. Auch mißt man das Gefälle durch die Strecke, welche das Wasser senkrecht durchfällt, wenn es um 1 Meile fortfließt; so beträgt das Gefälle des Rheines zwischen Mannheim und Mainz nur 1^m auf die Meile, während es zwischen Laufenburg und Basel 16^m beträgt. Je geringer das Gefälle ist, desto länger ist nicht blos die Fläche, auf welcher sich das Wasser reibt, sondern desto größer ist auch der Wasserdruck, von dem ja bekanntlich die Größe der Reibung abhängt. Außerdem reibt sich nicht blos die äußerste Wasserschicht an dem Bette, sondern an dieser Schicht, welche offenbar die kleinste Geschwindigkeit hat, reibt sich die folgende Schicht, an dieser wieder eine folgende u. s. w., deren Geschwindigkeiten immer größer werden; hierdurch ist der Einfluß der Reibung ein so complicirter, daß es noch nicht gelungen ist, denselben durch Rechnung aufzufinden. Man hat diesen Mangel durch zahlreiche Versuche zu ersetzen gesucht und gefunden, daß die Reibung nicht allein von der Länge, sondern auch von der Breite und Tiefe des Bettes abhängt und mit dem Quadrat der Geschwindigkeit selbst zunimmt.

Durch alle diese Einflüsse kann die Reibung so groß werden, daß, insbesondere bei kleinem Gefälle, die Geschwindigkeit durch das Fallen nicht mehr zunimmt, sondern daß jede neue Fallgeschwindigkeit durch die Reibung aufgezehrt wird. Es findet dies besonders bei Flüssen statt, wo die Reibung noch durch Unebenheiten und Richtungsänderungen des Bettes vergrößert wird. Die mittlere Geschwindigkeit hängt dann nicht mehr von der Druckhöhe h, sondern hauptsächlich vom Gefälle ab; so ist sie im Rheine zwischen Mannheim und Mainz etwa 1^m, bei Basel 3^m, wenn das Wasser die mittlere Höhe erreicht hat. Die Geschwindigkeit ändert sich dann nur bei Querschnittänderungen und bei Aenderungen des Wasserstandes: wird das Bett enger und flacher, und wird der Wasserstand höher, so wächst die Geschwindigkeit und die Oberfläche wird schiefer; so ist bei Basel bei Hochwasser die Geschwindigkeit 4^m, im Mississippi aber nur 2^m. Wird das

Bett weiter oder tiefer oder der Wasserstand niedriger, so wird die Oberfläche wagrechter und die Geschwindigkeit kleiner; so ist bei Basel die Geschwindigkeit des tiefsten Wasserstandes nur 2^m.

Für Kanäle und Röhren, in denen das Wasser eine bestimmte Fallhöhe h durchläuft, hat man (insbesondere Weisbach) Formeln aufgestellt, welche angeben, um wie viel die Druckhöhe h durch die Reibung vermindert wird, man hat also die Reibung in Druckhöhe dargestellt. Ebenso hat man in Druckhöhe durch Formeln denjenigen Verlust ausgedrückt, der von plötzlichen Richtungsänderungen an Knieen, von allmäligen Richtungsänderungen an Krümmungen, von Einschnürungen, Erweiterungen und Formänderungen der Kanäle und Röhren herrührt, von welchen Einflüssen besonders die beiden ersten bedeutende Hindernisse des Fließens bilden und nach vielfachen Versuchen ebenfalls mit dem Quadrat der Geschwindigkeit und mit dem Ablenkungswinkel wachsen. Zählt man alle diese in Druckhöhen ausgedrückten Hindernisse von der ursprünglichen Druckhöhe ab, so kann man durch den Rest h_1 mittels der Formel $v = \sqrt{(2gh_1)}$ die Geschwindigkeit des am Fuße dieser Höhe abfließenden Wassers finden.

Indessen werden solche Rechnungen nur für noch nicht ausgeführte Entwürfe angestellt. Für wirklich bestehende Wasserläufe, besonders für Kanäle, Flüsse und Bäche, sucht man die Geschwindigkeit practisch zu ermitteln. Man weiß aus Versuchen mit Schwimmstäben, daß ebenso, wie in Röhren die größte Geschwindigkeit in der Achse herrscht, in regelmäßigen Kanälen die größte Geschwindigkeit unter der Mitte der Oberfläche stattfindet. Besonders eingehende Versuche wurden im Auftrage des amerikanischen Congresses von 1851 bis 1861 von Humphreys und Abbot am Mississippi angestellt. Zieht man, nach diesen Forschern, an verschiedenen Punkten einer senkrechten Tiefenlinie horizontale Linien gleich den Geschwindigkeiten, so bilden die Endpunkte dieser Linien nahezu eine Parabel, welche an dem tiefsten Punkte der Tiefenlinie beginnt, weil dort die Geschwindigkeit gleich Null ist, und deren Achse der Oberfläche näher liegt als dem Boden. Die Achse, an deren Stelle die Geschwindigkeit am größten ist, liegt nicht so nahe unter der Oberfläche, wie man bisher allgemein annahm, so daß also der Reibung der Oberfläche an der Luft und vielleicht auch der Flüssigkeitshaut ein großer Einfluß zugeschrieben werden muß. Im Mississippi liegt nach jenen Forschern die Stelle der größten Geschwindigkeit, der sogenannte Stromstrich, in 0,317 der Flußtiefe. Bisher hatte man, älteren Versuchen gemäß, die größte Geschwindigkeit nahe unter der Oberfläche angenommen; man bestimmte dieselbe mittels Doppelschwimmern, Schwimmstäben oder mit Woltmanns hydrometrischem Flügelrade; dann berechnete man die mittlere Geschwindigkeit, indem man die größte, nach vielfachen Versuchsresultaten, mit 0,83 multiplicirte. Nach den genannten amerikanischen Forschern aber ergibt sich dieselbe aus der Formel $v = (\sqrt{(1{,}08\,u + 0{,}02\,b)} - 0{,}045\,\sqrt{b})^2$, worin u das arithmetische Mittel aus einigen an Schwimmern beobachteten Geschwindigkeiten bedeutet und b durch folgende Hilfsformel bestimmt wird, $b = 1{,}69\,\sqrt{(D + 1{,}5)}$, in welcher Formel statt D die Flußtiefe zu setzen ist.

Wenn man nun die mittlere Geschwindigkeit gefunden hat, so läßt sich auch die in einem Flusse, Bache oder Kanal per Secunde fortfließende Wassermenge berechnen, indem man den gefüllten Querschnitt mit der mittleren Geschwindigkeit multiplicirt. Fließt das Wasser durch einen bestimmten Querschnitt nicht fort, sondern aus, so muß man die Contraction berücksichtigen; der Coëfficient ist 0,9 oder 0,8 oder 0,7, je nachdem der Abfluß an der Oberfläche, am Boden in seiner ganzen Breite, oder am Boden in einem Theile der Breite stattfindet. Die Fälle treten ein, wenn man durch Anlage eines Wehres, d. i. eines durch ein Wasserbett gebauten Dammes, oder durch eine Schleuße, d. i. eine starke Bohlenwand, das Wasser ansammelt oder aufstaut, eine längere Strecke der Druckhöhe an einem Punkte concentrirt, um das Wasser dann über die Krone des Wehres oder der Schleuße auf einmal die ganze Druckhöhe herabfallen zu lassen, oder um ihm durch Oeffnen eines Schützen an einer beliebigen Stelle des Wehres oder der Schleuße Ausgang zu gestatten. Häufig leitet man zu diesem Zwecke das Wasser aus seinem eigentlichen Bette mittels Wehr und Schleuße in einen eigenen Kanal und dadurch an eine Arbeitsstelle. Für einen solchen Kanal sind nach Redtenbacher die besten Dimensionen des Kanalquerschnittes Q durch folgende Formel zu finden $b : t = 2{,}7 + 0{,}9\,Q$. Hier bedeuten b und t die Breite und Tiefe in Metern, während die amerikanischen Formeln für englische Fuße gelten.

179 **Aufg. 286.** Wie groß ist die Ausflußgeschwindigkeit aus einem cylindrischen Gefäße von 20^{cm} Durchmesser und 1^{m} Höhe durch eine Bodenöffnung und durch eine Seitenöffnung in 40^{cm} Höhe? Aufl.: 443^{cm}, 343^{cm}. — A. 287. Wenn durch die erste Oeffnung (von 2^{mm} Durchm.) allein Wasser abfließt, wie groß wird dann die Geschw. nach $1/4$ Stunde sein? Aufl.: Inhalt des Gefäßes $= 31416^{ccm}$; Ausflußmenge in $1/4$ St. $= 12525^{ccm}$; Rest $= 18891^{ccm}$; Restdruckhöhe 60^{cm}; Ausflußgeschwindigkeit 343^{cm}. — A. 288. Welcher Druck muß auf eine 1^{m} hohe Wassersäule ausgeübt werden, damit an ihrem Fuße eine Geschw. von 10^{m} entsteht? Aufl.: Aus der Formel $v = \sqrt{(2gh)}$ folgt die Druckhöhe $h = v^2 : 2g = 1000^2 : 2.980{,}8 = 509^{cm}$; da die Säule nur 100^{cm} hoch ist, so muß der zugefügte Druck so groß sein, als eine 409^{cm} hohe Wassersäule schwer ist, also auf jeden ^{qcm} 409^{g}. — A. 289. Wie groß müßte der von unten nach oben wirkende Druck sein, damit oben das Wasser mit 10^{m} Geschw. ausspritzt? Aufl.: $509 + 100 = 609^{g}$ per ^{qcm}. — A. 290. Wie groß ist die Ausflußmenge in 1 Sec. aus einem ganz gefüllten Gefäße von 80^{cm} Höhe und 400^{qcm} Grundfläche durch eine quadr. Oeffnung von 1^{cm} Seite. Aufl.: $q\sqrt{(2gh)} = 396^{ccm}$; wirkliche Menge $= 0{,}6 . 396 = 237{,}6^{ccm}$. — A. 291. Wie groß ist die Ausflußmenge in 1 Min. aus einem Gefäße von 3^{m} Höhe durch eine Kreisöffnung von 1^{cm} Dm. in einer dicken Wand? Aufl.: $0{,}8\, q \sqrt{(2gh)} = 28915^{ccm}$. — A. 292. Wie hoch muß ein ganz gefülltes Gefäß sein, damit die Geschw. des am Boden ausfließenden Wassers gerade $= 2g$ werde? Aufl.: $19{,}616^{m}$. — A. 293. Wie hoch, damit sie $= g$ werde? Aufl.: $4{,}904^{m}$. — A. 294. Wie groß muß die Seite einer 1^{m} hoch gelegenen quadr. Seitenöffnung in einem 4^{m} hohen, gefüllten Gefäße sein, damit in 10 Sec. 10000^{ccm} ausfließen? Aufl.: $1{,}5^{cm}$. — A. 295. In welcher Zeit wird ein Gefäß (Grundfl. $= f$, Höhe $= h$) durch eine Bodenöffnung q entleert sein? Anl.: $fh = x . 0{,}6q . \frac{1}{2} \sqrt{(2gh)}$; woraus $x = f \sqrt{2h} : 0{,}6q \sqrt{g}$. — A. 296. In welcher Zeit ist z. B. das Gefäß in A. 291. entleert? $x = 270$ Sec. — A. 297. Wann wird ein Teich von $4{,}5^{m}$ Höhe 30^{m} Länge und 20^{m} Breite durch eine am Boden aufgezogene Schützenöffnung von 1^{m} Höhe und 2^{m} Breite entleert sein? Aufl.: Bisher war stillschweigend eine dünne Wand vorausgesetzt; hier ist aber der Contractionscoëfficient 0,7; folglich $x = 7$ Minuten. — A. 298. Wenn eine Wasseruhr oder Klepsydra (κλέπτω, entwenden; ὕδωρ, Wasser) von 30^{cm} Höhe und 12^{cm} Weite in einer Stunde ausfließen sollte, welchen Durchm. müßte dann die Bodenöffnung haben? Aufl.: $0{,}13^{cm}$. — A. 299. Wenn die Klepsydra auch Viertelstunden zeigen sollte, wo müssen dann die 3 Marken angebracht werden? Anl.: Nach 175. verhalten sich die Abflußzeiten wie die Wurzeln aus den Druckhöhen, also diese wie die Quadrate der Zeiten, d. i. wie $1 : (3/4)^2 : (1/2)^2 : (1/4)^2$; folglich sind diese Höhen $= 30^{cm}$, $16\,7/8^{cm}$, $7\,1/2^{cm}$, $1\,7/8^{cm}$.

5. Anwendung der Bewegung des Wassers.

180 **Der Effect des bewegten Wassers.** Das bewegte Wasser enthält wie jeder bewegte Körper lebendige Kraft, ist also ein Motor; die Wasserkraft der Niagara-Fälle entspricht einem Effect von $4\,1/2$ Millionen Pferden, was mehr ist als alle Maschinen auf der ganzen Erde zusammen leisten. Da uns die Natur diesen Motor selbst darbietet, so wurde das bewegte Wasser seit den ältesten Zeiten zur Bewegung von Kraft- oder Triebmaschinen verwendet, um mittels derselben Arbeiten zu vollbringen. Der Effect des bewegten Wassers, d. i. die Arbeit, welche das in einer Sec. zur Kraftmaschine herbeifließende Wasser zu entwickeln vermag, wird bekanntermaßen gemessen durch das halbe Product der Masse dieses Wassers mit dem Quadrat der Geschwindigkeit desselben, oder auch durch das Product des Gewichtes dieser Wassermasse mit der Höhe, welche dieselbe durchfällt oder durchfallen müßte, um jene Geschwindigkeit zu erreichen. Diese beiden Messungsarten liefern dasselbe Resultat.

Denn bedeutet Q das in 1 Sec. herbeiströmende Wasservolumen in cbm, ist also das Gewicht desselben $1000\,Q^{kg}$ und die Masse dieses Gewichtes $1/g . 1000\,Q$, und ist die Geschwindigkeit des Wassers $= v$, so ist die in 1 Secunde entwickelte lebendige Kraft $= 1/2g . 1000\,Q v^2$. Nach der zweiten Messungsart ergibt sich die in 1 Sec. entwickelte Arbeit $= 1000\,Q . h$, wenn h die Höhe ist, die das Wassergewicht $1000\,Q$ durchfallen hat. Nun erhält aber das Wasser, welches die Höhe herab- oder unter dieser Druckhöhe abfließt, die Geschwindigkeit $v = \sqrt{(2gh)}$, woraus $h = v^2 : 2g$. Durch Substitution dieses Werthes

bedeutenden Effect erzielen. So findet sich in St. Blasien im Schwarzwalde eine Fourneyron'sche Turbine, welche durch 0,04cbm Wasser per Secunde mit 108m Gefälle 2300 Drehungen in 1 Min. macht und eine große Spinnerei in Bewegung setzt und doch nur ca. 30cm Durchmesser hat. Fourneyrons Turbine liefert 75 bis 80% des Effectes, hat aber den Nachtheil, daß das Rad am tiefsten Punkte der Druckhöhe aufgestellt werden muß, wodurch man nur sehr schwer zu demselben und zu dem noch unter ihm befindlichen Achsenlager gelangen kann; dann daß das Wasser starke Richtungsänderungen erleiden muß, um aus dem Gefäße durch die Leitkanäle an die Radschaufeln zu kommen; und endlich, daß bei einer Abnahme des Oberwassers der Umfang des Rades durch einen ringförmigen, von oben herabgelassenen Schützen theilweise geschlossen werden muß, wodurch ruhendes Wasser im Rade ist, das wirkungslos mitgedreht wird und an welchem sich das abfließende Wasser reibt. Den letzteren Mißstand hat in neuerer Zeit Girard in seiner hydropneumatischen Turbine dadurch zu mildern gesucht, daß er das luftdicht eingeschlossene Rad in comprimirter Luft laufen läßt, wodurch das ruhende Wasser in dem Rade herabgedrückt wird. Aber alle jene Mißstände sind zusammen beseitigt in der Henschel-Turbine, die man gewöhnlich Jonval-Turbine nennt, weil sie zuerst von Jonval (1841) öffentlich beschrieben wurde, während Oberbergrath Henschel in Cassel sie schon 1832 entworfen und 1841 in Holzminden aufgestellt hatte. In dieser Turbine befindet sich, wie Fig. 96 und 97 zeigen, das feste Leitschaufelrad über dem Turbinenrad, wodurch die Richtungsänderungen ermäßigt werden. Dann taucht das luftdichte cylindrische Gefäß in das Unterwasser, und der Abfluß wird durch einen Schützen s nach dem Zuflusse regulirt; hierdurch wird die theilweise Füllung des Rades vermieden, Gefäß und Räder sind immer gefüllt, und das Rad kann an jede beliebige Stelle des Gefäßes gebracht und dadurch sammt dem Achsenlager a leicht zugänglich gemacht werden. Diese ganz besondere Eigenthümlichkeit dieser Turbine liegt darin, daß der Druck an allen Stellen des Gefäßes derselbe ist, nämlich gleich dem Gewichte der Wassersäule H. Denn es sei der Luftdruck = A, so wirkt an der unteren Grenze der Leitschaufeln von oben nach unten der Druck $A + h$, aber von unten nach oben $A - (h_1 + z)$; (die Buchstaben sind durch Fig. 96 klar). Folglich bleibt ein Druck von oben nach unten $= (A + h) - [A - (h_1 + z)] = h + h_1 + z = H$. Wie man nun auch die drei Größen h, h_1 und z wählen möge, immer bleibt ihre Summe = H; folglich ist der Druck von oben nach unten an allen Stellen des Rohres derselbe; die beiden Räder können in dem Rohre jede beliebige Lage haben, vorausgesetzt, daß die vom Luftdrucke zu tragende Wassersäule $h_1 + z$ nicht über die Größe des Luftdruckes hinausgehe, also unter 10m bleibe.

Fig. 96.

Fig. 97

Es gibt auch Kraftmaschinen, in denen das Wasser durch Stoß wirkt; alsdann wird aber die lebendige Kraft des Wassers nur dann in nennenswerthem Betrage von der gestoßenen Radschaufel aufgenommen, wenn die Fläche derselben 6—8mal größer ist als der

Querschnitt des Wasserstrahles, weil nur dann die von der Aufschlagstelle ringsum mit großer Geschwindigkeit abfließenden Wassertheilchen ihre Geschwindigkeit großentheils abgeben können. Hieraus folgt, daß Stoßräder nur bei kleinen Wassermengen anwendbar sind. Die Stoßwirkung ist der lebendigen Kraft proportional, also dem Querschnitte des Strahles und dem Quadrat der Differenz zwischen der Geschwindigkeit desselben und der Geschwindigkeit der Radschaufel. — Den Stoß des Wassers benutzt man auch in einer Wasserförderungsmaschine ohne Kolben, nämlich in dem hydraulischen Widder (Montgolfier 1796). Das aus einiger Höhe in einer Röhre fortfließende Wasser fließt durch eine obere Oeffnung der Röhre aus und erhält an dieser Oeffnung eine solche Geschwindigkeit, daß es das Ventil dieser Oeffnung schließen kann; dadurch ist es gezwungen, mit großer Geschwindigkeit weiter zu fließen, und kann deßhalb ein in einen Windkessel führendes Ventil aufstoßen, in den Windkessel einströmen und dort durch den Luftdruck, dem Princip der Windkessel gemäß (s. 204), gehoben werden.

Da in neuerer Zeit in vielen Städten Wasserleitungen eingerichtet worden sind, durch welche Wasserkräfte von 20 bis 100m Druckhöhe zu Gebote stehen, so hat man Maschinen gebaut, die von diesem Wasser getrieben werden, sogen. Wassermotoren, welche in zahlreichen Fällen, besonders im Kleinbetriebe, nützliche Anwendung finden und möglicherweise zum Betriebe der elektrischen Lichtmaschinen eine große Zukunft haben werden. Wir wollen deßhalb einen solchen Wassermotor näher betrachten. Fig. 98 und 99 stellen den hydraulischen Motor von A. Schmid in Zürich dar, wie derselbe von der Schumacher'schen Maschinenfabrik in Köln gebaut wird. Wie der Längenschnitt Fig. 98 und die Seitenansicht Fig. 99 zeigen, ist der Hauptbestandtheil ein Cylinder ab, in welchem durch das Wasser ein Kolben hin- und herbewegt wird, wie in der Dampfmaschine durch den Dampf. Hierdurch wird auch die mit dem Kolben fest verbundene Stange, die Kolbenstange, welche luftdicht durch die Stopfbüchse des Cylinderdeckels geht, hin- und herbewegt, und dadurch die Welle des Schwungrades in Umdrehung versetzt. Diese Welle ist nämlich an der Stelle, wo die Kolbenstange an sie herantritt, U-förmig ausgebogen, verkröpft, und eben an den wagrechten Grund dieser Ausbiegung ist die Kolbenstange angelenkt, so daß die hin- und hergehende Bewegung der Kolbenstange sich in eine drehende der Welle verwandeln muß. Dies ist die einfache Haupteinrichtung

Fig. 98.

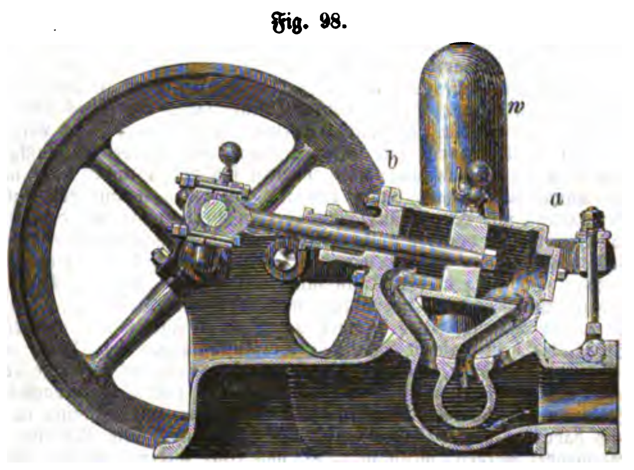
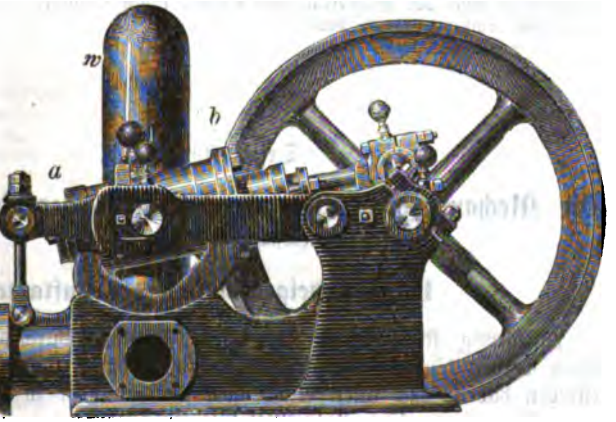


Fig. 99.



des Motors; ein wesentliches Nebenelement ist die Steuerung, d. i. die Vorrichtung, durch welche das Wasser gezwungen wird, abwechselnd vor und hinter den Kolben zu treten, sowie vor dem Kolben abzufließen, wenn es hinter demselben wirkt, und hinter dem Kolben abzufließen, wenn es vor demselben wirkt. Diese Steuerung besteht aus den unter dem Cylinder sichtbaren zwei Kanälen, die an beiden Enden des Cylinders in denselben einmünden, sowie daraus, daß der Cylinder ein oscillirender ist. Faßt man z. B. einen runden Bleistift an beiden Seiten zwischen Daumen und Zeigefinger und wiegt an dem einen Ende den Stift auf und ab, so hat man einen oscillirenden, wiegenden oder schwingenden Cylinder. In dem Schmid'schen Wassermotor bewegt sich bei der Drehung der Welle das linke Ende der Kolbenstange (Fig. 98) nicht blos hin und her, sondern auch auf und nieder; folglich muß die Kolbenstange die linke Hälfte des Cylinders ebenfalls auf und nieder drücke. Der Cylinder kann diesem Drucke nachgeben, weil er nicht mit dem Gestelle der Maschine verschraubt ist, sondern vornen und hinten in der Mitte seiner Länge Zapfen trägt, die in Lagern ruhen, wie einigermaßen in Fig. 99 sichtbar ist. Wenn nun der Cylinder oscillirt, so muß auch das unten kreisförmig abgeschliffene Gehäuse der beiden Kanäle, das in beiden Figuren sichtbar ist, sich abwechselnd nach links und rechts drehen. Hierbei schleift es auf dem genau gleich kreisförmig abgeschliffenen oberen Rand des Maschinengestelles hin und her, der die Zu- und Abflußkanäle des Wassers enthält. Und zwar ist das kleine schwarze kreisförmige Loch der Zuflußkanal und rings um dasselbe zieht sich der Abflußkanal. In der Stellung, die der Cylinder in Fig. 98 hat, fließt das Wasser aus dem Zuflußkanal in den rechten Cylinderkanal, wie durch Pfeile angedeutet ist, gelangt so hinter den Kolben und treibt denselben durch seinen Druck voran, während das Wasser vor dem Kolben durch den linken Cylinderkanal in den Abflußkanal abströmt. Ist der Kolben an den Deckel angelangt, so biegt sich der Cylinder links nach unten, wodurch sich das Kanalgehäuse nach rechts bewegt. Hierdurch kommt der linke Cylinderkanal außer Verbindung mit dem Abflußkanal, aber in Verbindung mit dem Zuflußkanal, so daß jetzt das Treibwasser vor den Kolben strömt und denselben zurückschiebt; das Wasser hinter dem Kolben fließt dann durch den rechten Steuerkanal und eine rechts von dem schwarzen Loch sichtbare Oeffnung in den Abflußkanal. Die Bewegung der Maschine ist eine sehr ruhige und gleichmäßige, weil das Wasser nur durch seine Druckhöhe, nicht aber durch Stoß wirkt, ein großer Vorzug dieses Motors gegen die kleinen Gas- und Luftmotoren; und damit Stöße, die beim raschen Schließen der Zuflußkanäle oder durch andere Zufälle sich einstellen, unschädlich gemacht werden, steht der durch das schwarze Loch angedeutete Zuflußkanal auf der hinteren Seite der Maschine mit dem hoch emporsteigenden Windkessel w in Verbindung. Auch die Abwesenheit von Ventilen wirkt günstig in dieser Beziehung, sowie auch dadurch, daß dieselben leicht verletzlich sind. Die Maschine kann auch als Pumpe angewendet werden, wenn sie z. B. von einer anderen gleichen mit Wasser, Dampf oder Luft getriebenen Maschine in Gang gesetzt wird. Die Maschinenfabrik von Schumacher in Köln baut diesen Motor von 0,1 bis 36° zu dem Preise von 300 bis 3000 Mark, und der Wasserbetrieb kostet per Pferdekraft und Stunde kaum 1/2 Mark; der Nutzeffect erreicht die seltene Höhe von 80 bis 90 Procent.

Dritte Abtheilung.

Die Mechanik der luftförmigen Körper oder die Aeromechanik.

(Aerostatik und Pneumatik.)

1. Grundeigenschaften der Luftarten.

184 Luftförmig ist ein Körper, wenn seine Theilchen durch die geringste Kraft verschoben werden können, aber keinen Zusammenhang, sondern im Gegentheil das Bestreben haben, nach allen Richtungen aus einander zu gehen. Dies ist nach 54. der Fall, wenn sämmtliche Moleküle eines Körpers in sehr rascher fortschreitender Bewegung, bis zu 1844 ^{m} Geschwindigkeit nach allen Richtungen begriffen sind, so daß durch die lebendige Kraft der Moleküle ihre gegenseitige Anziehung weit überwogen wird. Demnach würde ein frei im Weltraume befindliches Luft-

volum sich durch den ganzen unendlichen Raum ausbreiten; die Lufthülle oder Atmosphäre der Erde dagegen kann dies nicht, weil die Anziehung der Erde stärker wirkt als die lebendige Kraft der Luftatome. Die Luftarten stimmen also darin mit den festen und flüssigen Körpern überein, daß sie der Schwere unterworfen sind, daß sie also auch ein Gewicht haben oder einen Druck auf ihre Unterlage ausüben. Sie stimmen mit den Flüssigkeiten in der absolut leichten Beweglichkeit ihrer Theilchen überein und unterscheiden sich mit diesen hierin von den festen Körpern; von den flüssigen unterscheiden sie sich durch ihre Ausdehnsamkeit, ihr Bestreben, sich vermöge der fortschreitenden Bewegung ihrer Moleküle nach allen Richtungen auszubreiten. Aus dieser Erklärung des Wesens der Luftarten ergeben sich folgende Grundeigenschaften derselben:

a. Die Luftarten haben wie die Flüssigkeiten absolut leicht bewegliche Theilchen; es gelten daher alle Gesetze, die sich für die Flüssigkeiten aus dieser leichten Beweglichkeit ergaben, auch für die Luftarten: so das Gesetz von der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes nach allen Richtungen, das Gesetz über den Auftrieb, die Gesetze über den Ausfluß.

b. Die Luftarten haben wegen dieser leichten Beweglichkeit keine selbständige Gestalt; wegen ihres Ausbreitungsbestrebens oder ihrer Ausdehnsamkeit haben sie aber auch kein selbständiges Volumen. Hierin unterscheiden sie sich von den Flüssigkeiten, ebenso auch in allen Eigenschaften, die sich aus der Ausdehnsamkeit ergeben.

c. Die Luftarten sind sehr stark und leicht zusammendrückbar; denn vermöge ihrer Ausdehnsamkeit sind die Theilchen der Luft sehr weit von einander entfernt, können also eine starke Annäherung erleiden. Bei einer im Gleichgewichte befindlichen Luftmenge ist das Ausdehnungsbestreben durch einen äußeren Druck aufgehoben; folglich ist der Beginn des Zusammendrückens sehr leicht. Soll das Zusammendrücken weitergehen, so gilt das Mariotte'sche Gesetz (54.), was wir noch näher betrachten werden.

d. Wegen ihrer Ausdehnsamkeit übt jedes Volumen von Luft einen Druck auf die Grenzen des Volumens aus, der entweder durch die Ausdehnsamkeit der umgebenden Luft oder durch die Festigkeit der Grenzwände aufgehoben wird; dieser Druck, Spannung oder Expansion genannt, wächst mit der Dichte, weil mit dieser die Zahl der gegen die Grenze stoßenden Luftmoleküle vermehrt wird (Mariottes Gesetz).

e. Wegen ihrer Ausdehnsamkeit und wegen der weiten Entfernung der Luftmoleküle von einander dringen die Luftarten in einander ein, sie haben Diffusion gegen einander.

f. Ebenso dringen die Luftarten in die Poren der festen Körper und in die Molekularzwischenräume der Flüssigkeiten ein und werden, wenn sie denselben so nahe kommen, daß die gegenseitige Anziehung die lebendige Kraft der zurückprallenden Luftatome überwiegt, von denselben festgehalten oder absorbirt; ebenso kann sich auch auf den Oberflächen fester Körper eine Schicht verdichteter Luft, eine Lufthaut, anhäufen.

g. Die atmosphärische Luft wird nach oben immer weniger dicht; denn die unteren Luftschichten werden durch das Gewicht der oberen zusammengedrückt; nach oben wird aber die Höhe und daher das Gewicht der drückenden Luftmasse immer kleiner, also auch die Zusammenpressung immer geringer, die Luft immer dünner. So ist in einer Höhe von 10 Meilen die Luft 7000 mal dünner als auf der Erdoberfläche, in einer Höhe von 30 Meilen würde sie 250 000 Mill. mal dünner sein. Ebenso wie die Dichte nimmt die Spannung der Luft ab; die Geschwindigkeit der Luftmoleküle aber wird nur durch die niedrige Temperatur der oberen Luft kleiner, nimmt also nicht so stark ab wie die Spannung. Folglich kann in hohen Luftschichten die Geschwindigkeit der Luftmoleküle so groß sein, daß ihre lebendige Kraft die Schwere überwiegt und die Luftmoleküle in den Weltraum hinaus geschleudert werden. Die Höhe, in welcher dieses Verhältniß stattfinden müßte, würde die Grenze der Atmosphäre sein. Die meisten Forscher geben die Höhe unter 12 Meilen an; doch hat man schon Sternschnuppen von 50 Meilen Höhe gesehen und erklärt das Aufleuchten derselben als eine Wirkung der Luft. Also müßte sich auch noch in solcher Höhe Luft befinden. Die Frage über die Höhe der Atmosphäre ist daher noch nicht ausreichend beantwortet. Der Stoff der Atmosphäre enthält 78,492% Stickstoff, 20,627% Sauerstoff und 0,041% Kohlendioxyd; dazu kommt eine wechselnde Menge von Wasserdampf, im Mittel 0,84%.

185 **Der Luftdruck** (Torricelli 1643). Wenn auch die Luft 777mal leichter ist als Wasser und nach oben hin immer leichter wird, so ist doch das Gewicht der Atmosphäre oder der Druck auf ihre Unterlage wegen ihrer bedeutenden Höhe sehr

groß. Der Druck auf eine beliebige Fläche ist (nach 156.) gleich dem Gewichte einer Luftsäule, deren Grundfläche die Fläche ist und deren Höhe gleich dem Abstande dieser Fläche von der Luftgrenze ist. Da man diese Höhe nicht genau kennt, so kann man auch jenen Druck, den man Luftdruck nennt, nicht berechnen; man muß denselben daher durch einen Versuch bestimmen. Dieser Versuch wurde zuerst von Torricelli angestellt und ist ebenso einfach wie entscheidend. Man füllt eine durch einen Hahn verschlossene, etwa 80 ^{cm} lange, graduirte Glasröhre mit Quecksilber, verschließt die Oeffnung mit dem Finger, kehrt die Röhre um und taucht sie mit dem schließenden Finger in ein mit Quecksilber gefülltes Glasgefäß. Zieht man nun den Finger weg, so beginnt das Quecksilber in der Röhre zu fallen, bleibt aber sogleich wieder etwa bei 76 ^{cm} Höhe stehen und ist durch kein Schütteln und Aufstoßen der Röhre zum Fallen zu bewegen. Es steht also das Quecksilber in der mit dem Gefäße communicirenden Röhre 76 ^{cm} höher als in dem Gefäße, während es nach dem Satze der communicirenden Gefäße beiderseits gleich hoch stehen müßte. In communicirenden Gefäßen kann der Stand der Flüssigkeit nur dann verschieden sein, wenn auf den Spiegel in dem einen Gefäße ein größerer Druck ausgeübt wird, als auf den Spiegel in dem anderen Gefäße; der erste Spiegel senkt sich dann, der zweite hebt sich. Folglich muß auch in unserem Versuche auf dem äußeren Spiegel ein größerer Druck vorhanden sein als auf dem inneren. Ueber diesem inneren Spiegel ist keine Luft; man nennt diesen luftleeren Raum Torricellis Vacuum oder Leere; es wird also auf den inneren Spiegel kein Druck ausgeübt. Auf dem äußeren Spiegel aber ruht nichts als Luft; es kann folglich nur der Druck der äußeren Luft, das auf dem äußeren Spiegel ruhende Luftgewicht das Quecksilber in der Röhre 76 ^{cm} hoch in die Höhe gedrückt halten. Daß wirklich ein solcher Druck auf den äußeren Spiegel das Quecksilber in der Röhre hebt, kann man durch einen gut schließenden ringförmigen Kolben beweisen, den man auf den äußeren Spiegel setzt; ein Druck auf diesen Kolben bringt das Quecksilber in der Röhre zum Steigen. Dagegen fällt dasselbe ganz herab bis zur Höhe des äußeren Spiegels, wenn man durch Oeffnen des Hahnes Luft in das Vacuum treten läßt und dadurch den Druck beiderseits gleich groß macht. Aus diesem Versuche erhellt sonach der Satz: **Der Luftdruck ist gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76 ^{cm} Höhe.**

Doch ist dies keine gesetzmäßig feststehende Größe, sondern nur ein Mittelwerth für die ebene Oberfläche der Erde, etwa in der Höhe der Meeresfläche; denn auch auf dieser ändert sich der Luftdruck nach Zeit und Ort und schwankt etwa zwischen 72 und 80 ^{cm} Quecksilberhöhe; wenn man sich aber gar nach oben von derselben entfernt, so wird der Luftdruck immer kleiner, beträgt z. B. auf dem Chimborasso weniger als halb so viel. Indessen meint man stets, wenn von einem Drucke gleich einer Atmosphäre die Rede ist, einen Druck gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76 ^{cm} Höhe. Darnach läßt sich auch der Luftdruck als Gewicht ausdrücken. So ist z. B. der Luftdruck auf 1 ^{qcm} gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 1 ^{qcm} Grundfläche und 76 ^{cm} Höhe, also von 76 ^{ccm} Inhalt; da nun 1 ^{ccm} Quecksilber 13,59 ^{g} wiegt, so ist der Luftdruck auf 1 ^{qcm} = 13,59 . 76 ^{g} = 1,0328 ^{kg}, und auf 1 ^{qm} = 10328 ^{kg}. Demnach hat eine gewöhnliche Tischplatte mehr als 200 Ctr. Luft zu tragen. Daß sie unter dieser Last nicht zerbricht, hat einfach seinen Grund in dem Princip der gleichmäßigen Fortpflanzung des Druckes, vermöge dessen der Druck nicht blos von oben nach unten, sondern auch von unten nach oben stattfindet, ja an jeder beliebigen Stelle nach allen Seiten gleich groß ist. Folglich ist der Druck nur merkbar, wenn er in irgend einer Richtung beseitigt wird; dann kann er in den übrigen Richtungen wirken und sich so manifestiren. Wir werden auf diese Weise durch eine Reihe von Luftpumpenversuchen den Luftdruck nachweisen. Vielleicht erklärt sich so mancher Unglücksfall in Schlachten; wenn eine größere Kugel sehr nahe an einem Menschen vorbeifliegt, so reißt dieselbe die Luft mit sich fort, erzeugt also einen luftleeren Raum auf der einen Seite des Menschen; von der anderen Seite oder auch von innen wirkt dann der Luftdruck mit seiner großen Stärke, schleudert den Menschen zu Boden oder zerstört innere Gefäße. Der Gesammtdruck der Luft auf die ganze Oberfläche des Menschen ist bedeutend;

denn der Mensch hat ungefähr $1^1/_2$ qm Oberfläche, erfährt also einen Druck von etwa 15 000 kg oder 300 Ctr. Dieser große Druck aber quetscht uns ebenso wenig zusammen, als er überhaupt unter gewöhnlichen Umständen uns merkbar wird; denn er findet auch von innen nach außen, ja zu beiden Seiten jedes kleinsten Theilchens statt. Auf kleine Theilchen ist derselbe aber sehr klein, und unter demselben sind die kleinsten Elementar-Organe entstanden, sind also zur Ertragung desselben gebildet. Daß der Luftdruck in dem Menschen auch von innen nach außen wirkt, beweisen uns die Schröpfköpfe und künstlichen Blutegel, sowie das Hervorbringen von Blut bei raschem Aufsteigen mit Luftballonen. Der Luftdruck ist dem Menschen sogar sehr nützlich; denn er trägt unsere Arme und Beine. Die Gelenkköpfe derselben füllen nämlich die Gelenkpfannen nicht aus, sondern lassen einen luftleeren Raum übrig, gegen welchen die äußere Luft die Glieder anpreßt. Werden sämmtliche Beinmuskeln und Bänder an einem Cadaver abgeschält, so fallen die Beine noch nicht aus den Gelenkhöhlen; bohrt man aber die Seitenwand der Gelenkhöhle durch, so daß Luft in dieselbe strömen kann, so löst sich sofort das Glied ab. — Man kann auch den Luftdruck mit einer Wassersäule vergleichen; das Wasser ist 13,59 mal leichter als Quecksilber; damit eine Wassersäule dem Luftdrucke das Gleichgewicht halte, muß sie deßhalb $13{,}59 \times 76$ cm $= 10{,}328$ m hoch sein. Der Luftdruck ist demnach auch gleich dem Gewichte einer Wassersäule von etwa 10 m Höhe oder ungefähr gleich 1 kg per qcm. Der Umstand, daß der Luftdruck nicht eine höhere Wassersäule als von 10 m heben kann, gab Torricelli die Veranlassung zur Entdeckung des Luftdruckes. Dieses Tragen von Wasser durch den Luftdruck zeigt uns jedes vollgefüllte, mit Papier bedeckte und dann umgekehrte Glas. Wir benutzen es in der pneumatischen Wanne, um Glasgefäße mit Gas zu füllen; das Gefäß wird zuerst mit Wasser gefüllt, mit der Hand verschlossen und dann umgekehrt in das Wasser gestellt; nach weggezogener Hand fällt das Wasser nicht heraus. Bringt man nun die Oeffnung eines Gasentbindungsrohres unter die Mündung, so steigt das Gas in Blasen vermöge des Auftriebes in die Höhe und verdrängt das Wasser. Auch aus anderen gefüllten und oben geschlossenen Gefäßen fließt eine Flüssigkeit nur, wenn durch die Oeffnung Luft eindringen kann, aus sehr engen Bodenöffnungen oder aus etwas ansteigenden Seitenöffnungen gar nicht, aus weiteren Oeffnungen nur dann in einem dicken Strahle, wenn auch oben Luft zugelassen wird; so muß man an Fässern das Spundloch öffnen, an Kannen dürfen die Deckel nicht luftdicht schließen. — Der Luftdruck, welcher irgendwo herrscht, pflanzt sich mit großer Raschheit durch die Umgebung fort und zwar selbst durch die feinsten Risse und Spalten; so herrscht in unseren Zimmern, obwohl dieselben nur wenig Luft enthalten, derselbe Druck wie außen; und zwar ist der Druck in derselben horizontalen Ebene überall gleich groß. Aus der Größe des Luftdruckes auf 1 qcm läßt sich der Druck auf die ganze Erdoberfläche, also das Gewicht der ganzen Atmosphäre leicht berechnen; man findet denselben = 5,19 Billionen Kilogramm.

Aufg. 305. Wie groß ist der Luftdruck auf einen Tisch von 1 m Länge und $^1/_2$ m Br., auf einen Kreis von 1 dm Durchmesser, auf ein Haus von 20 m Länge und 10 m Breite, auf eine Kugel von 1 dm Durchmesser? Aufl.: 5164 kg, 81 kg, 2 Mill. kg., 324 kg. — A. 306. Wie groß ist der Druck auf einen Dampfkolben von 8 dm Durchmesser durch 2 Atmosphären Dampf, wenn auf der anderen Seite Luftleere ist? Aufl.: 10 400 kg. — A. 307. Wie groß, wenn anderseits der Luftdruck herrscht? Aufl.: 5200 kg. — A. 308. Welchen Druck hat ein Taucher in 100 m Tiefe auszuhalten? Aufl.: 150 000 kg. — A. 309. Wie groß ist der Druck auf 1 qdm bei einem Barometerstande von 80 cm Höhe? Aufl.: 108 kg. — A. 310. Wie hoch müßte eine Aethersäule sein, um bei 71 cm Bar. der Luft das Gleichgewicht zu halten? Aufl.: 13,6 m. — A. 311. Wie viele Atmosphären beträgt der Druck auf den Kolben einer Wassersäulenmaschine, wenn das Wasser 51,74 m hoch steht? Aufl.: Atm. — A. 312. Wie hoch würde die Luft sein, wenn ihre Dichte überall $^1/_{777}$ wäre? Aufl.: $76 \,.\, 13{,}59 : {}^1/_{777} = 7952$ m = 1 Meile ca. — A. 313. Wie hoch muß man steigen, damit der Druck um 1 mm Quecksilber kleiner wird? Aufl.: 10,5 m. — A. 314. Wie hoch würde die Atmosphäre sein, wenn ihre Schwere allein durch ihre Centrifugalkraft aufgehoben werden sollte? And.: Die Centrifugalbeschleunigung ist auf dem Aequator nach 41. $= v^2 : r = 464^2 : 6\,349\,200 = 0{,}03$. Der Punkt, wo Centrifugalkraft und Schwerkraft gleich sein sollen, sei x mal so weit entfernt; dann ist die Centrifugalbeschleunigung $x^2 : x$ = x mal größer, $= 0{,}03\,x$; die Beschleunigung der Schwere ist dort $9{,}808 : x^2$; hieraus 03 $x = 9{,}808 : x^2$, woraus $x^3 = 327$, also x = ca 7; also ist in der Höhe von 6 Erdradien die Luft unmöglich.

187 **Das Barometer.** Das Barometer ist ein Instrument zum Messen des Luftdruckes (βαρύς = schwer). Der Torricelli'sche Versuch bietet schon ein solches Instrument; doch ist dasselbe in dieser Form zu wenig handlich und hat daher zahlreichen Abänderungen weichen müssen, die indeß alle auf demselben Grundgedanken

beruhen. Die so entstandenen Quecksilberbarometer sind entweder Gefäßbarometer, Phiolenbarometer oder Heberbarometer; die Metallbarometer haben einen anderen Grundgedanken.

Im gewöhnlichen Leben findet man am häufigsten die Phiolenbarometer; die Röhre desselben biegt sich unten um und erweitert sich in ein Gefäß von der Form einer kleinen Flasche oder Phiole, welche noch theilweise mit Quecksilber gefüllt ist. Der Luftdruck wird hier gemessen durch den Abstand des Spiegels in der Phiole von dem in der Röhre; da aber der erste Spiegel sich senken muß, wenn der letzte sich hebt, und umgekehrt, und da die Phiole gewöhnlich nicht so weit ist, daß man das Heben und Senken des Spiegels in derselben außer Acht lassen kann, so haben die Beobachtungen des Röhrenspiegels allein, ohne Rücksicht auf den Phiolenspiegel keinen wissenschaftlichen Werth; für das gewöhnliche Leben, für die ohnedies nicht ganz zuverlässigen Wetteranzeigen aber sind sie ausreichend. Genauer schon können Gefäßbarometer sein.

Das Gefäßbarometer kommt nämlich der ursprünglichen Torricelli'schen Einrichtung am nächsten. Es besteht aus Röhre, Gefäß und Skale. Das Gefäß kann so weit genommen werden, daß das Fallen und Steigen in der Röhre höchstens ein unmerkliches Steigen und Fallen in dem Gefäße zur Folge hat, daß also die Skale fest mit dem Apparat verbunden sein kann und zwar so, daß der Anfangspunkt oder Nullpunkt der Skale mit dem Gefäßspiegel zusammenfällt. Die größte Genauigkeit hat Fortin (1820) in seinem Gefäßbarometer erreicht, das auch vortrefflich als Reisebarometer eingerichtet ist. Zu diesem Zwecke ist das Gefäß ganz verschlossen und nur beim Gebrauche wird durch eine Schraubenöffnung Luft zugelassen. Der Boden des Gefäßes ist doppelt; der obere Boden besteht aus einem Lederbeutel, gegen welchen der Knopf einer durch den unteren Boden gehenden Schraube drückt; hierdurch kann der Spiegel im Gefäße bei jeder Beobachtung genau in den Nullpunkt der Skale gebracht werden. Dieser Punkt fällt nämlich zusammen mit der Spitze eines von dem Gefäßdeckel herabragenden Elfenbeinstäbchens und ist erreicht, wenn diese Spitze und ihr Bild im Quecksilberspiegel gerade einander berühren. Hiermit ist die erste Hauptschwierigkeit bei Barometerbeobachtungen überwunden. Die zweite Schwierigkeit besteht in dem richtigen Ablesen der Höhe der Quecksilberkuppe in der Röhre. Um dieses richtige Ablesen möglich zu machen und zugleich die Röhre, welche quecksilberdicht durch eine geliderte Deckelöffnung des Gefäßes tief in das Quecksilber hinabgeht, zu schützen, ist die Röhre von einer an das Gefäß angeschlossenen Messinghülse umgeben, auf der die Skale eingegraben ist. In der Gegend der Kuppe hat die Hülse zwei sich gegenüberliegende Spalten, innerhalb deren durch Zahnstange und Rädchen ein zweifacher Nonius verschiebbar ist. Der vordere und hintere Rand der unteren Kante dieses Nonius müssen für das beobachtende Auge mit der Kuppe in eine Gerade fallen; dann deutet der Nullpunkt des Nonius gerade auf die abzulesende Stelle der Skale. An ihrem oberen Ende ist die Hülse durch eine Cardanische Aufhängung an einem cylindrischen Holzgehäuse befestigt, das den ganzen Apparat umschließt und sich in drei Theile zerlegen läßt, die beim Gebrauche als Füße zum Aufstellen dienen. So genau dieses Barometer auch ist, so leidet es doch daran, daß durch die Capillardepression das Quecksilber in der Röhre etwas tiefer steht, als es durch den Luftdruck stehen müßte. Für Röhren von 20mm Durchmesser und mehr ist dieser Fehler verschwindend klein; festen Barometern gibt man daher einen solchen Durchmesser. Bei Reisebarometern ist dies aber unmöglich; wenn nun auch solche Barometer hauptsächlich zu Höhenmessungen angewendet werden, wo immer zwei Beobachtungen vorkommen, bei deren Vergleichung der Fehler sich verkleinert, und wenn man auch mittels genau angefertigter Tabellen Correctionen anzubringen sucht, so bleibt doch das beste Gefäßbarometer hinter dem Heberbarometer darin zurück, daß bei dem letzteren die Depression wegfällt.

Das Heberbarometer besteht nämlich nur aus einer umgebogenen Röhre, deren längerer Schenkel geschlossen ist und die eigentliche Barometerröhre bildet, während der kürzere Schenkel offen bleibt und dem Luftdrucke Zugang gestattet. Hierdurch ist die Depression beiderseits gleich groß und hebt sich daher auf. Allein bei diesem Barometer steigt der eine Spiegel immer ebenso viel, als der andere sinkt; es ist daher der untere Spiegel nicht ein fester Anfangspunkt für die Ablesung, sondern ebenso veränderlich wie der obere. Es bietet demnach hier die genaue Ablesung Schwierigkeiten. Entweder muß man eine doppelte Ablesung, bei beiden Spiegeln, vornehmen, und die eine Zahl von der anderen subtrahiren, wodurch die bei der Ablesung möglichen Fehler sich verdoppeln können; oder man muß die Skale oder auch die Röhre durch Schrauben verschiebbar machen, und bei jeder Beobachtung so lange verschieben, bis der Nullpunkt an den unteren Spiegel kommt. Dieses Coincidiren des Spiegels mit dem Nullpunkte ist eben so gut eine Fehlerquelle wie eine Ablesung; daher sind beide Methoden ziemlich gleich. Indessen sind die Heberbarometer doch einer großen Genauigkeit fähig und sind sehr compendiös, also für Reisebeob-

achtungen sehr tauglich. Für diesen Zweck müssen sie noch Vorrichtungen zum Abschlusse des offenen Schenkels haben, welche sehr mannichfacher Art sind. Auch hat Geißler in Bonn von der Vollkommenheit der jetzigen Glasarbeiten eine Anwendung auf das Barometer gemacht, indem er dasselbe zusammenlegbar, also für Reisen besonders compendiös construirte.

Außer den in vorstehenden Beschreibungen angedeuteten Umständen, die bei der Anfertigung und dem Gebrauche der Barometer beobachtet werden müssen, wenn die Resultate auf Genauigkeit Anspruch erheben wollen, muß zu demselben Zwecke noch eine Reihe von Einflüssen im Auge behalten werden, die wir im Zusammenhange mit den schon besprochenen anführen wollen: 1. das Quecksilber muß chemisch rein sein; von gröberen Unreinigkeiten wird es mittels Pressen durch Hirschleder, von feineren durch Waschen mit Salpetersäure und dann mit Wasser befreit. 2. Die Röhre muß überall gleich weit sein; zu dem Zwecke wird sie calibrirt, d. h. ein Quecksilbertropfen wird an verschiedene Stellen der Röhre gebracht. Hat er nicht überall gleiche Länge, so ist die Röhre unbrauchbar. 3. Die Röhre muß luft- und dampffrei sein; um dies zu erreichen, wird sie mit Quecksilber ausgekocht. Nach Untersuchungen von Morren (1865) ist es unmöglich, alle Luft und alle Dämpfe zu vertreiben und ist weder Quecksilber, noch die Röhrenwand luftfrei und daher das Vacuum niemals vollkommen; am vollkommensten ist es, wenn beim Neigen das Quecksilber mit hellem Klange gegen die Röhre stößt; ist der Klang dumpf geworden, so muß man das Auskochen wieder vornehmen. 4. Die Röhre darf nicht zu eng sein, weil sonst das Quecksilber schwer beweglich wird, und weil bei Gefäßbarometern die Unregelmäßigkeiten der Depression bei engeren Röhren größer werden. Vor Beobachtungen gewöhnlicher Barometer klopft man an das Gestell, um die Adhäsion aufzuheben. 5. Die Temperatur muß berücksichtigt werden; denn das Quecksilber dehnt sich für 1° C. um $^1/_{5550}$ seines Volumens aus. Gewöhnlich reducirt man die Barometerstände auf 0°, muß also von dem beobachteten Stande so viele 5550tel abzählen, als Temperaturgrade stattfinden; bei großer Genauigkeit muß man auch auf die Veränderungen des Glases und der Skale durch die Wärme Rücksicht nehmen. 6. Bei Gefäßbarometern muß man wegen der Depression 1^{mm} für Röhren von $4-6^{mm}$ Weite addiren, $0,5^{mm}$ für Röhren von $6-10^{mm}$, $0,1^{mm}$ für Röhren von $10-15^{mm}$. 7. Bei der Ablesung des Standes muß das Auge in einer Horizontalen mit der Quecksilberkuppe sein; bei feineren Apparaten sind zu diesem Zwecke verschiebbare Mikroskope mit Fadenkreuzen angebracht. 8. Bei Gefäßbarometern muß der Gefäßspiegel mit dem Nullpunkte coincidiren. 9. Soll ein Barometer transportirt werden, so neigt man es, bis das Quecksilber an das Röhrenende stößt und trägt es in dieser Lage. Wollte man es aufrecht tragen, so würde das Quecksilber so stark schwanken, daß Luftblasen eindringen könnten, wodurch das Barometer unbrauchbar würde. 10. Reisebarometer müssen einen sicheren Verschluß haben; der beste für Heberbarometer ist von Greiner in Berlin. 11. Schiffsbarometer müssen in Cardanischen Ringen hängen; doch sind für gewöhnliche Beobachtungen auf Schiffen die Metallbarometer vorzuziehen.

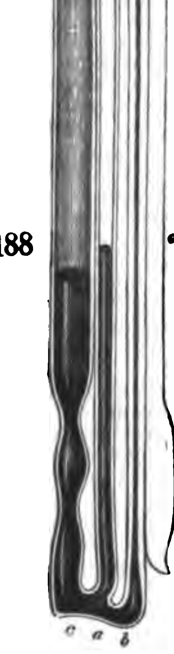
Das Metallbarometer oder Aneroidbarometer (α priv. und ἀήρ = Luft). Dieses Barometer ist zwar nicht so genau wie das Quecksilberbarometer, ist also nur dann zu wissenschaftlichen Zwecken brauchbar, wenn ihm zuverlässige Correctionstabellen beigegeben sind. Es ist aber besonders geeignet für Beobachtungen in polaren Gegenden, wo das Quecksilber gefriert; dann ist es sehr bequem zu transportiren und daher auch für Höhenmessungen in entlegenen Gegenden sehr tauglich. Endlich ist es nicht so leicht zerbrechlich wie das gewöhnliche Barometer aus Glas und Quecksilber, und paßt daher besser als Zimmerbarometer, wobei es auch einen Zimmerschmuck bildet. Man hat besonders zwei Arten von Metallbarometern: das Holosteric (ὅλος = ganz, στερεός = fest) von Vidi und das Metallic von Bourdon. Das Metallic besteht aus einem kreisbogenförmigen, hohlen, luftleeren Messingringe von langem, linsenförmigem Querschnitte; das eine Ende desselben ist an dem Gehäuse befestigt, das andere wirkt frei auf einen Zeiger. Wird der Luftdruck größer, so erfährt die äußere Ringfläche eine größere Vermehrung des Druckes als die innere, weil die erstere größer ist als die letztere; folglich muß die Krümmung verstärkt werden und muß das freie Ringende den Zeiger mehr voranschieben. Das Holosteric besteht aus einer möglichst luftleeren, hermetisch geschlossenen Messingdose, deren äußerst dünner Deckel durch ringförmige Cannelirungen sehr elastisch ist. Wenn der Luftdruck zu- oder abnimmt, so biegt sich dieser Boden einwärts oder auswärts; diese Bewegung wird durch einen complicirten Mechanismus auf einen langen Zeiger übertragen, der sich auf dem Umfange des kreisförmigen Gehäuses dreht, wo die Gradeintheilung angebracht ist. Balfour Stewart hat 1870 seine Vergleichungsversuche eines Aneroids mit einem Normalquecksilberbarometer bekannt gemacht; nach diesen, sowie nach den Meteorologencongressen in Wien und Leipzig (1872 und 73) ändern die Aneroide ihre Nullpunkte oft plötzlich und sind auch ihre Wärmecorrecturen unzuverlässig; besonders ungenau zeigten sich die Aneroide bei ge-

ringen Spannungen, so daß die Angaben bei 60cm Luftdruck unbrauchbar werden. Wäre dieser Mangel nicht zu beseitigen, so würden die Aneroide für Höhenmessungen unbrauchbar sein. Nach Goldschmid (1870) liegt der Fehler hauptsächlich in der Uebertragung der kleinen Bewegungen der luftleeren Behälter durch Räder und Hebel auf die Zeiger, und soll bei dem Goldschmid'schen Aneroid (Fig. 100) nicht vorhanden sein. Dasselbe enthält unter dem Schlitze dd' die doppelt wellenförmig cannelirte luftleere Dose, welche in der Mitte unten befestigt, bei dem Steigen und Sinken der oberen Fläche einen derselben parallelen Stab mit damit auch dessen vordere Stirnfläche e hebt oder senkt. In der Mitte dieser rechts am Schlitze sichtbaren Stirnfläche ist ein wagrechter Strich, der als Index auf die Skale f deutet, an der die Hunderte des Luftdrucks abgelesen werden. Zur genaueren Einstellung dient ein zweiter, federnder Stab mit der Stirnfläche e' links von e, der ebenfalls einen Index trägt, welcher vor der Ablesung in eine Wagrechte mit dem von e gestellt werden muß. Auf diesen zweiten Stab drückt nämlich eine Mikrometerschraube, welche mittels des drehbaren Ringes b gehoben und gesenkt werden kann und so jene genaue Einstellung möglich macht, nach deren Vornahme die Zehner und Einer an diesem getheilten Ringe abgelesen werden; zum genauen Ablesen dient die Lupe g.

Fig. 100.



Fig. 101.



Das Bestreben, die leichte Tragbarkeit und Handlichkeit des Aneroids mit der Genauigkeit des Quecksilberbarometers zu verbinden, hat zu manchen Erfindungen geführt, von denen wir das tragbare Barometer von Calantarients (1870) erwähnen wollen; dasselbe besteht (Fig. 101) aus 4 ein Ganzes bildenden Glasröhren c, a, b und d; die 3 ersten sind unten mit Quecksilber, die 4te ist mit verdünnter Luft erfüllt, während die erste, oben geschlossene c in dem Raume über dem Quecksilber ganz mit Aether ausgefüllt ist. Die Röhre a ist offen und nimmt den Luftdruck auf, der an der Stellung des feinen Quecksilberfadens in b abgelesen wird. Das Steigen und Fallen ist nur gering, weil in d Luft enthalten ist; daher kann der ganze Apparat geringe Dimensionen haben; Fig. 101 stellt ihn in halber Größe dar.

Das Wagbarometer von Morland (1680), welches den Luftdruck durch die Schwingungen eines Wagbalkens angibt, und der Barograph von Secchi (1858), der mittels desselben die Angaben des Barometers selbstthätig aufschreibt, ist in 611. aufzufinden.

Anwendung des Barometers. Die genaue Bestimmung des Luftdruckes ist bei vielen naturwissenschaftlichen Untersuchungen z. B. zur Erforschung der Wetterverhältnisse der Erde, unbedingt nothwendig; daher ist dem Physiker das Barometer ein unentbehrliches Instrument. Außerdem wird dasselbe zu Höhenmessungen (s. 593.) und im gewöhnlichen Leben als Wetteranzeiger (s. 592.) verwendet.

188 **Die Ausdehnsamkeit der Luftarten.** Die Ausdehnsamkeit oder Expansibilität der Luftarten ist das Bestreben derselben, sich in jeden dargebotenen Raum auszubreiten. Das Vorhandensein dieser für die Luftarten charakteristischen und unterscheidenden Eigenschaft folgt schon aus der Definition der Luftarten, daß nämlich die Moleküle derselben eine lebhafte fortschreitende Bewegung besitzen; dann ist diese Eigenschaft nach dem fünften Axiom eine einfache Folge des Luftdruckes; die Luftarten besitzen keine Festigkeit, folglich müssen sie dem Luftdrucke eine gleiche Gegenkraft, eine ausdehnende Kraft entgegensetzen; endlich kann die Ausdehnsamkeit durch zahlreiche Versuche nachgewiesen werden: Ist ein luftleerer abgeschlossener Raum in Verbindung mit einem lufterfüllten abgeschlossenen Raume, so strömt aus dem letzteren Raume Luft in den ersteren; liegt in einer Glasglocke eine zugebundene zusammengedrückte Blase, so dehnt sich dieselbe bis zum Zerspringen aus, wenn die Glasglocke luftleer

gepumpt wird. Steigen in einem hohen mit Wasser gefüllten Gefäße Luftblasen auf, so werden dieselben immer größer, weil sie in den höheren Schichten einen geringeren Druck erleiden.

Vermöge der Ausdehnsamkeit übt jedes Gasvolumen, mag es eingeschlossen sein oder nicht, auf seine Grenzen wie im Inneren, einen Druck aus, den man Spannung, Elasticität oder Expansivkraft nennt. Die Größe der Expansivkraft ist, so lange das Gas mit der Luft in Verbindung steht, gleich dem Luftdrucke, also gleich einer Atmosphäre, gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76^{cm} Höhe; sie nimmt zu und ab wie der Luftdruck. Ebenso nimmt aber auch die Spannung einer eingeschlossenen Gasmasse zu, wenn der äußere Druck auf dieselbe größer wird, wenn sie also durch einen äußeren Druck auf ein kleineres Volumen zusammengepreßt wird, wie besonders einfach die Knallbüchse der Knaben zeigt. Die Spannung oder Expansivkraft eines Gases nimmt zu, wenn das Volumen desselben kleiner wird; erklärlich ist dies nach der mechanischen Theorie der Gase (54.) dadurch, daß bei abnehmendem Volumen die Dichte des Gases wächst und demnach eine größere Anzahl von Gasmolekülen stoßend gegen die Grenzwände fliegt. Ob die Zunahme der Spannung in demselben Maße erfolgt wie die Abnahme des Volumens, muß eigens untersucht werden. Theoretisch haben wir diese Untersuchung schon in der „mechanischen Theorie der Gase" (54.) geführt; wir fanden dort, daß das Product pv der Spannung p mit dem Volumen v unter der Voraussetzung gleichbleibender Temperatur constant ist, daß also p in demselben Maße zunimmt wie v abnimmt. Diese wichtige Eigenschaft der Gase wurde schon von Boyle (1662) entdeckt, von Mariotte (1679) bestätigt und veröffentlicht, von Arago und Dulong (1820) im Auftrage der französischen Akademie von Neuem untersucht und endlich von Regnault (1845) für möglichst viele Gase und Temperaturen erforscht, und mit später anzuführenden Beschränkungen bestätigt gefunden. Diese Wahrheit führt den Namen das Mariotte'sche Gesetz; dasselbe läßt sich in verschiedenen Gestalten aussprechen.

Das Mariotte'sche Gesetz. 189 1. **Bei gleichbleibender Temperatur ist das Product aus der Spannung und dem Volumen einer bestimmten Gasmenge constant.**

$$p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 = \text{Const.}$$

2. **Bei gleichbleibender Temperatur verhalten sich die Spannungen einer bestimmten Gasmenge umgekehrt wie die zugehörigen Volumina, oder die Spannung ist dem Volumen umgekehrt proportional.**

$$p_1 : p_2 = v_2 : v_1 \quad \text{oder} \quad p_1 = \frac{p_2 v_2}{v_1} = \frac{\text{Const.}}{v_1}$$

Da die Dichte in demselben Verhältnisse zunimmt, wie das Volumen abnimmt, und umgekehrt, da also Dichte und Volumen einander umgekehrt proportional sind, so kann statt des Volumens die Dichte im umgekehrten Verhalten eingeführt werden und daher das Gesetz auch folgende Gestalten annehmen:

3. **Bei gleichbleibender Temperatur verhalten sich die Spannungen eines Gases direct wie die Dichten desselben, oder die Spannung ist der Dichte direct proportional.**

$$p_1 : p_2 = d_1 : d_2 \quad \text{oder} \quad p_1 = \frac{p_2}{d_2} d_1 = \text{Const.}\, d_1$$

4. **Bei gleichbleibender Temperatur ist der Quotient aus der Spannung durch die Dichte eines Gases constant.**

$$p_1 : d_1 = p_2 : d_2 = \text{Const.}$$

Die Spannung ist immer gleich dem äußeren Drucke; das Gesetz könnte daher auch für den äußeren Druck in den verschiedenen Gestalten ausgesprochen werden. Ueberhaupt treten in dem Gesetze 4 Größen: außerer Druck, Spannung, Dichte und Volumen auf: daher sind die möglichen Formen des Gesetzes, deren Aussprache dem Schüler empfohlen wird, noch sehr mannichfaltig; die einfachste und vollständigste Form ist die, daß äußerer Druck, Spannung und Dichte einander direct und dem Volumen umgekehrt proportional sind.

Weil die Versuche von Mariotte leicht anzustellen sind, so wollen wir das Gesetz mittels derselben nachweisen. Für verdichtete Gase benutzt man eine umgebogene Glasröhre mit einem kürzeren geschlossenen und einem möglichst langen offenen Schenkel, die auf einem Gestelle befestigt und mit einer Skale an jedem Schenkel versehen ist. Man bringt zuerst soviel Quecksilber in die Röhre, daß es in beiden Schenkeln bis an den Nullpunkt reicht. In dem geschlossenen Schenkel ist dann Luft von der Spannung der Atmosphäre, weil sie nur dem Drucke derselben ausgesetzt ist. Füllt man nun soviel Quecksilber zu, daß es in dem offenen Schenkel 76cm, 2.76cm, 3.76cm u. s. w. höher steht als in dem geschlossenen, so nimmt in dem letzteren die Luft nur einen 2, 3, 4 u. s. w. mal kleineren Raum ein als vorher, womit das Gesetz für diese Pressungen nachgewiesen ist. Denn z. B. bei 3.76cm Quecksilber hat die abgeschlossene Luft einen Druck von 4 Atmosphären zu erleiden; der Versuch zeigt, daß sie dann wirklich einen 4 mal kleineren Raum einnimmt; außerdem muß die innere Spannung auch 4 mal größer sein, da sie ja 4 mal so viel zu tragen vermag als vorher, während auch ihre Dichte 4 mal größer geworden ist. — Für verdünnte Gase bedarf man eines weiten, hohen, mit Quecksilber gefüllten Glasgefäßes und einer calibrirten, graduirten, mit einem Hahne verschließbaren Glasröhre. Man taucht zuerst die Röhre, den Hahn oben und offen, in das Quecksilber, bis dasselbe bei einem beliebigen Theilstriche, innen und außen gleich hoch, steht. Dann schließt man den Hahn und hat dadurch eine abgeschlossene Luftmenge von der Spannung der Atmosphäre. Zieht man die Röhre nun aus dem Quecksilber, so hoch, daß die abgesperrte Luft den doppelten Raum einnimmt, so wird das Quecksilber in der Röhre auch $^1/_2 . 76 = 38^{cm}$ gestiegen sein. Folglich hat die abgesperrte Luft nur noch die halbe Spannung wie vorher, womit das Gesetz auch für diesen Fall nachgewiesen ist. Denn der Druck in der Röhre muß dem äußeren Luftdrucke gleich sein; da aber innen 38cm Quecksilber stehen, so muß die abgesperrte Luft ebenfalls eine Spannung von $38^{cm} = ^1/_2$ Atm. ausüben.

Durch solche Versuche ist das Gesetz nur für geringe Pressungen nachgewiesen. Arago und Dulong dehnten ihre Versuche bis zu 27 Atmosphären aus, ohne Abweichungen von dem Gesetze für die Luft zu finden. Natterer ging gar bis zu 2700 Atmosphären und fand, daß bei solchen hohen Pressungen das Gesetz selbst für die permanenten Gase nicht mehr gilt. Für leicht coërcible gilt das Gesetz schon bei 3—4 Atmosphären nicht mehr, woraus man schloß, daß für alle Gase die Abweichungen von dem Gesetze um so größer seien, je näher sie dem flüssigen Zustande kommen. Erst Regnaults ausgezeichnete Versuche stellten fest, daß auch für permanente Gase selbst bei kleinen Pressungen das Mariotte'sche Gesetz nur eine, wenn auch sehr starke, Annäherung an die Wahrheit ist, und zwar, daß atmosphärische Luft und Stickstoff etwas stärker zusammendrückbar sind, als es nach dem Gesetze sein sollte, gerade wie es bei Kohlendioxyd und mit den von Pouillet und Despretz untersuchten Gasen Ammoniak, Cyan, Schwefeldioxyd u. s. w. der Fall ist, daß aber der Wasserstoff, auf der anderen Seite allein stehend, nach der entgegengesetzten Seite abweicht, nämlich weniger zusammendrückbar ist, als es das Gesetz verlangt.

Das Gesetz darf nicht etwa so mißverstanden werden, als ob verschiedene Gase von gleicher Dichte auch gleiche Spannung hätten; vielmehr findet das gerade Gegentheil statt; verschiedene Gase von verschiedener Dichte haben dieselbe Spannung, wenn sie nur unter gleichem Drucke stehen; ein Volumen Wasserstoff, das unter dem Luftdrucke steht, hat dieselbe Spannung wie dasselbe Volumen atm. Luft, obwohl das letztere 14 mal so schwer ist als das erstere. Da nun, wie schon früher erwähnt, in gleichen Gasvolumen gleich viele Moleküle enthalten sind, so müssen die leichteren Moleküle eine größere Geschwindigkeit haben, um denselben Druck ausüben zu können, wie gleich viele Moleküle von größerer Masse; ein Schluß, zu dem wir schon früher gelangt sind.

Die Ausdehnsamkeit und die Spannung der Gase stehen noch in wesentlichem Zusammenhange mit der Temperatur, den wir in der Lehre von der Wärme noch näher zu betrachten haben. Hier ist nur zu bemerken, daß das Mariotte'sche Gesetz demgemäß nur unter der Voraussetzung unveränderter Temperatur gilt. Außerdem haben Regnaults Versuche den Schluß erlaubt, daß bei höherer Temperatur alle Gase dem Mariotte'schen Gesetze genauer gehorchen, und zwar um so genauer, je näher sie einer gewissen Grenz-

Temperatur kommen. Es gilt demnach das Mariotte'sche Gesetz für jedes Gas mathematisch genau nur bei einer ganz bestimmten, noch unbekannten Temperatur; über dieselbe hinaus erhitzt, entfernen sich die Gase wieder mehr von dem Gesetze.

190 Aufg. 315. Welchen Raum nimmt 1^{cbm} Luft bei 267^{mm} und bei 1000^{mm} Barometerstand ein? Aufl.: $2{,}85^{cbm}$, $0{,}76^{cbm}$. — A. 316. Was wiegt 1^{cbm} Luft bei 300^{cm} und bei 950^{mm} Barometerstand, wenn er bei 760^{mm} 1293^{g} wiegt? Aufl.: 5100^{g}, 1616^{g}. — A. 317. Um wieviel muß man bei 500^{mm} Barometerstand steigen, damit das Quecksilber um 1^{mm} sinke? Aufl.: $15{,}9^{m}$. — A. 318. Welcher Barometerstand herrscht in der Höhe, in welcher man 21^{m} steigen muß, damit das Quecksilber um 1^{mm} sinke? Aufl.: 380^{mm}. — A. 319. Wie hoch muß in dem offenen Schenkel des Mariotte'schen Apparates für verdichtete Luft das Quecksilber stehen, wenn es in dem geschlossenen, in 12^{cm} getheilten, Schenkel von 0 auf 7 gestiegen ist? Aufl.: 1824^{mm} über dem Grad 7. — A. 320. Zu welchem Grade ist das Quecksilber im geschlossenen Schenkel gestiegen, wenn man soviel Quecksilber zugegossen hat, daß es im offenen Schenkel 100^{cm} höher steht? Aufl.: $(76 + 100 - x) : 76 = 12 : (12 - x)$, woraus $x = 6{,}6^{cm}$. — A. 321. Wie hoch muß in der ausgezogenen Röhre des Mariotte'schen Apparates für verdünnte Luft das Quecksilber steigen, wenn die Luft einen 3mal größeren Raum einnimmt? Aufl.: 50^{cm} — A. 322. Wie hat sich der Luftraum vermehrt, wenn das Quecksilber 19^{cm} stieg? Aufl.: Um $^1/_3$. — A. 323. Wenn man bei dem bekannten Versuche über die Undurchdringlichkeit der Luft ein umgestülptes Glas 40^{cm} tief unter Wasser drückt, welchen Raum nimmt dann die Luft noch ein? Aufl.: 0,96 des ursprünglichen. — A. 324. Mit welcher Kraft wird das losgelassene Glas nach oben getrieben (abgesehen vom Auftriebe des Wassers)? Aufl.: $0{,}043^{kg}$ per ^{q}cm. — A. 325. Mit welcher Kraft, den Auftrieb mit gerechnet? Aufl.: $0{,}083^{kg}$. — A. 326. Ein ^{cdm} Wasserstoff von 0,07 sp. Gew. strömt in einen luftleeren Raum von 3^{cdm} ein; wie groß ist nachher das sp. Gew.? Aufl.: 0,0175. — A. 327. In einem in Quecksilber tauchenden, umgestülpten Glascylinder steht das Quecksilber 6^{cm} tiefer als außerhalb; wie groß ist das sp. G. des eingeschlossenen Chlors? Aufl.: 2,44. $^{82}/_{76} = 2{,}65$.

2. Anwendung des Luftdruckes und des Mariotte'schen Gesetzes.

191 **Die Ventile.** Die Ventile sind Vorrichtungen, um hohle Räume abwechselnd zu öffnen und zu schließen. Sie sind entweder Klappenventile, Kegelventile, Kugelventile oder Blasenventile. Bei den ersteren ist eine um ein seitlich liegendes Gelenke drehbare Metall- oder Lederplatte über eine Oeffnung des Hohlraumes gelegt; bei dem zweiten und dritten ist die Wand rings um die Oeffnung kegel- oder kugelförmig ausgehöhlt, und in diese Höhlung ist ein anschließender kegel- oder kugelförmiger Metallkörper eingesenkt; bei dem letzten ist über die Oeffnung eine Haut gespannt und an dem aufliegenden Theile entweder durchlöchert oder nur theilweise befestigt. Wird nun über einen der genannten Ventile die Luft verdünnt, so wird die Spannung derselben nach dem Mariotte'schen Gesetze geringer als der Luftdruck, der im Inneren des Gefäßes herrscht; dieser hebt daher die Ventile, wodurch der Luft das Ausströmen möglich ist; wenn dagegen die Luft unter den Ventilen verdünnt wird, so werden die Ventile durch den äußeren Luftdruck fest gegen die Oeffnung gepreßt, und diese wird dann luftdicht geschlossen. Zu demselben Zwecke kann auch die Spannung der Luft verwendet werden; wenn z. B. die Luft über den Ventilen verdichtet wird, so ist ihre Spannung größer als der unter denselben vorhandene Luftdruck, die Ventile werden also geschlossen; umgekehrt müssen sie sich öffnen, wenn die innere Luft verdichtet wird, also durch ihre Spannung den äußeren Luftdruck überwindet. Die Ventile haben den Hähnen gegenüber den Vorzug, daß sie selbstthätig sind, d. h. durch die Vorgänge innerhalb des Apparates sich selbst nach Bedürfniß öffnen und schließen, während die Hähne entweder der Hand oder eines Mechanismus bedürfen.

192 **Das Saugen und die Pipette.** Bei dem Saugen und Trinken erweitern wir die Lungen, daher wird die Luft in den Lungen wie in dem mit den Lippen gefaßten Sauggefäße, Saugröhre, Pipette (eine mit kugeliger Anschwellung versehene Saugröhre) verdünnt; es überwiegt alsdann der Luftdruck die innere Spannung und drückt die Flüssigkeit, in welche das Sauggefäß getaucht ist, in dasselbe hinein. Verschließt man schnell die Saugöffnung mit dem Finger, so kann man die Pipette vollgefüllt aus der Flüssigkeit ziehen, ohne daß dieselbe herausläuft. Ein künstliches Saugen findet in dem Aspirator statt; die ältere Form desselben war einfach eine Flasche mit einem Ausflußhahn am Boden und einer Stöpselröhre; floß aus der gefüllten Flasche das Wasser nach dem Oeffnen des Hahnes aus, so mußte die Luft oder das Gas in den Gefäßen, zu welchen die Stöpselröhre führte, in die Flasche kommen, wurde also aus oder durch jene Gefäße gesaugt. Der neue Aspirator (Fig. 102)

besteht aus 2 Flaschen mit Bodentubulus, die untere offen, die obere geschlossen und mit einer Stöpselsaugröhre a versehen. Werden die Hähne b u. c geöffnet, so fließt das Wasser durch den Schlauch bc in die untere Flasche und saugt so aus der Röhre a Gas oder Luft in die obere Flasche. Ist die obere Flasche wasserleer, so zieht man sie mittels des Seiles d herab, die untere Flasche kommt hinauf, und kann durch Einsetzen des Stöpsels jetzt die Stelle der oberen übernehmen u. s. w. Ist die untere Flasche ebenfalls geschlossen und mit einem Ausblaserohr versehen, so kann sie, falls das Gestell einige Höhe besitzt, zum Blasen benutzt werden.

Fig. 102.

193 **Der Stechheber.** Derselbe besteht aus einer weiten, unten sich verengernden Röhre, die, in eine Flüssigkeit eingetaucht, sich als communicirendes Gefäß füllt. Wird sodann die obere Oeffnung geschlossen, so kann man den Heber wie die Pipette, aus der Flüssigkeit nehmen, ohne daß solche herausfließt, vorausgesetzt, daß die untere Oeffnung ein gegenseitiges Ausweichen von Luft und Wasser nicht gestattet. Denn würde etwas ausfließen, so müßte oben ein luftleerer oder luftverdünnter Raum entstehen, so daß der äußere Luftdruck die Flüssigkeit in denselben heben würde. Die Zaubertrichter und Zauberkannen enthalten stechheberartige Hohlräume, deren obere Oeffnungen versteckt liegen, so daß durch unvermerktes Schließen und Oeffnen derselben das Fließen bald aufhört, bald wiederbeginnt. Auch aus der Sturzflasche der alten Studirlampen kann das Oel nur fließen, wenn die Oeffnung nicht mehr in Oel taucht und daher die Luft in die Sturzflasche steigen kann. Bei dem Füllen der Moderateur-Lampen steht das Oel über einem ringsum fest an den Gefäßwänden liegenden Lederkreise; wird derselbe durch das Aufziehen der daran befestigten Feder gehoben, so entsteht unter ihm ein leerer Raum, der äußere Luftdruck biegt alsdann den Lederkreis so nach unten, daß ringsum Raum frei wird, durch welchen das Oel unter das Leder fließt; der Druck der Feder auf das Leder treibt dann beim Brennen das Oel durch eine lange Röhre in den Docht.

194 **Der Schenkelheber.** Der Schenkelheber ist eine gekrümmte Röhre, deren einer Schenkel in eine Flüssigkeit taucht, während an der Oeffnung des anderen Schenkels gesaugt wird. Es fließt alsdann die Flüssigkeit so lange aus, als die Oeffnung des äußeren Schenkels unter dem Wasserspiegel im Gefäße liegt. Das Anlassen erklärt sich wie beim Saugen; um das Fortfließen zu erklären, fassen wir die an der höchsten Stelle wirkenden Kräfte ins Auge; denn an dieser wagrechten Stelle kann nur dann ein fortdauerndes Fließen stattfinden, wenn nach einer Richtung überwiegende Kräfte wirken. Sowohl auf den Wasserspiegel im Inneren als auf die äußere Oeffnung wirkt der Luftdruck $= 10^m$ Wasser, und pflanzt sich von beiden Seiten her von unten nach oben an die höchste Stelle fort. Derselbe erfährt aber beiderseits eine Verminderung und zwar durch das Gewicht der in den Schenkeln befindlichen Wassersäulen. Von innen nach außen wirkt aber nur entgegen die Wassersäule von dem Wasserspiegel an bis zur höchsten Stelle, deren Höhe wir mit x bezeichnen, von außen nach innen die Wassersäule von der Oeffnung bis zur höchsten Stelle, deren Höhe $= y$ sein möge; folglich ist der Druck von innen nach außen $= 10 - x$, von außen nach innen $= 10 - y$. Durch den ersten Druck kann das Fließen nach außen stattfinden, wenn derselbe größer ist als der zweite, wenn also x kleiner ist als y, d. h. wenn der Wasserspiegel höher liegt als die äußere Oeffnung. Das allmälige Kleinerwerden des nach außen wirkenden Ueberdruckes bei dem allmäligen Sinken des Wasserspiegels zeigt sich sehr deutlich an dem Dünnerwerden des Ausflußstrahles;

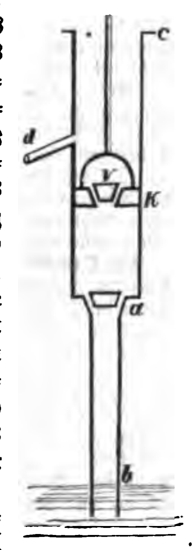
bricht derselbe endlich ab, so kann man ihn durch rasches Neigen des Hebers nach außen wieder hervorrufen, während durch Neigen nach innen ein sofortiges Zurücksteigen des Wassers stattfindet, weil dann y kleiner als x, also der Druck von außen größer ist als der von innen. Wäre $x = 10^m$, so wäre der Druck von innen = 0, also das Fließen unmöglich; ein Heber darf nicht höher als 10^m sein.

195 Durch den Heber erklärt sich der Vexirbecher; derselbe enthält einen versteckten Schenkelheber, dessen innere Mündung am inneren Boden des Bechers steht, während die äußere in die äußere Bodenfläche fällt; wird der Becher bis zur Höhe des Heberknies gefüllt, so fließt derselbe ganz aus. Ganz ähnlich sind in der Natur die intermittirenden Quellen eingerichtet: eine durch Sickerwasser sich allmälig füllende Erdhöhle steht durch einen knieförmig nach oben gebogenen Kanal mit der Erdoberfläche in Verbindung; ist die Höhle bis zur Höhe des Knies gefüllt, so fließt die Quelle und zwar so lange, bis die Höhle geleert ist: dann sistirt sie, bis die Höhle wieder gefüllt ist. In ähnlicher Weise sucht man durch Heberkanäle es zu verhindern, daß in Kanälen das Wasser über ein gewisses Niveau steigt. Vielleicht wirkt das Princip des Hebers auch bei intermittirenden Seen, wie z. B. am Zirknitzer See mit; nicht ins Spiel tritt dasselbe 1. bei dem künstlichen intermittirenden Brunnen der physikalischen Cabinete, welcher auf der schon betrachteten Erscheinung beruht, daß der Ausfluß aufhört, wenn der Luftzutritt über den Wasserspiegel abgesperrt ist; 2. bei dem Geiser, welcher auf der Spannung des Dampfes beruht. — Auch die Spielerei der fraterna caritas und der Heberspringbrunnen sind Anwendungen des Hebers; den Giftheber kann man ansaugen, ohne die Flüssigkeit zu berühren, und den Doppelheber kann man sogar anlassen, ohne anzusaugen.

196 **Die Handspritze** besteht aus einer Röhre, in welcher ein Kolben luftdicht durch einen Griff auf und ab geschoben werden kann. Wird die Röhre mit der an dem Boden befindlichen engen Oeffnung in Flüssigkeit gesteckt, so steigt dieselbe bei dem Aufziehen des Kolbens. Schiebt man dann den Kolben nieder, so wird die Luft zwischen demselben und der Flüssigkeit verdichtet; ihre Spannung wächst und treibt die Flüssigkeit durch die enge Oeffnung hinaus.

197 **Die Saugpumpe.** Die Hauptbestandtheile einer Saugpumpe (Fig. 103) sind: die ins Wasser reichende Saugröhre ab mit dem sich nach oben öffnenden Saugventil a, der luftdicht mit der Saugröhre verbundenen Stiefel ac mit dem Ausflußrohre d und der durch den Pumpenschwengel auf und ab zu schiebende Kolben k mit dem sich ebenfalls nach oben öffnenden Kolbenventil v. Wird der Kolben aufwärts gezogen, so wird die Luft zwischen demselben und dem Saugventil verdünnt, das Kolbenventil muß sich schließen, das Saugventil muß sich öffnen und die Luft in der Saugröhre muß sich dann ebenfalls verdünnen. Folglich wird der äußere Luftdruck größer als die Spannung der inneren Luft und treibt das Wasser in der Saugröhre aufwärts. Durch öftere Wiederholung dieses Spieles gelangt das Wasser über das Saugventil a und dann über das Kolbenventil v, wonach es durch den Arm d ausfließt. Da der Luftdruck nur einer Wassersäule von 10^m Höhe das Gleichgewicht halten kann, so darf sich der Kolben nicht weiter als 10^m von dem Wasserspiegel entfernen. Als man 1643 in Florenz eine höhere Pumpe erfolglos anwandte, gelangte Torricelli zu der Entdeckung des Luftdruckes, während man vorher das Steigen des Wassers in der Saugröhre als eine Folge des horror vacui, einer Abneigung der Natur vor dem leeren Raume erklärt hatte.

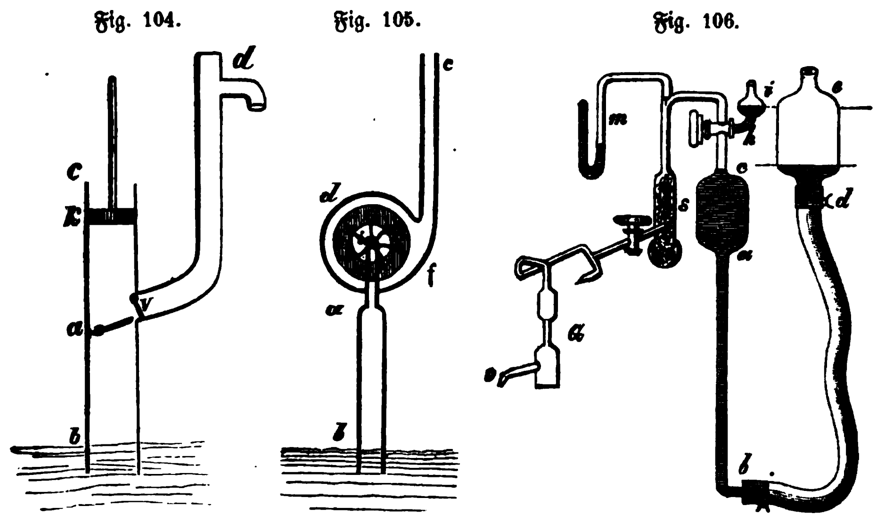
Fig. 103.



198 **Die Druckpumpe.** Die Druckpumpe enthält wie die Saugpumpe eine Saugröhre ab (Fig. 104), ein Saugventil a, Stiefel ac, Kolben k; aber der Kolben ist nicht durchbrochen und enthält nicht ein Ventil wie bei der Saugpumpe, sondern über dem Saugventil a zweigt sich seitlich das sogenannte Steigrohr vd ab, das weiter oben das Ausflußrohr d trägt. Durch

den Kolbenhub findet auch hier wieder Luftverdünnung und Emporsteigen des Wassers in das Saugrohr statt. Bei dem Kolbenschube aber, wo sich das Ventil a schließt, öffnet sich das Druckventil v, und es strömt anfänglich Luft und später Wasser in das Steigrohr. Soll dasselbe in dem Steigrohre sich hoch erheben, so muß dies durch einen Druck des Kolbens geschehen, ebenso wie in der Saugpumpe an der Kolbenstange eine größere Zugkraft wirken muß, wenn das Ausflußrohr mehr als 10ᵐ von dem Wasserspiegel entfernt ist.

Fig. 104. Fig. 105. Fig. 106.



199 **Die Centrifugalpumpe.** An dieser Pumpe (Fig. 105) sind wie bei der Druckpumpe Saugrohr ab und Steigrohr fc vorhanden; der Stiefel ist durch ein cylindrisches Gehäuse df ersetzt, Kolben und Ventile durch ein Flügelrad, das sich in dem Gehäuse sehr rasch dreht. Das Saugrohr theilt sich bei a in zwei Arme ai, welche das Wasser nach dem centralen Raume i des Gehäuses führen, wodurch dasselbe in die innersten Schaufelräume gelangt. Hier geräth es in drehende Bewegung und wird durch seine immer größer werdende Schwungkraft in das Steigrohr fc getrieben, ebenso wie im Beginne des Pumpens dies mit der Luft geschieht, wodurch die Luftverdünnung in der Saugröhre bewirkt wird. Da die Pumpe keine Ventile hat, so ist sie für unreines Wasser sehr vorzüglich. Außer den angeführten Wasserförderungsmaschinen gibt es noch eine große Reihe anderer, die aber nicht auf dem Luftdrucke beruhen, wie die Schöpf-, Wurf- und Schneckenräder, die Paternosterwerke, die Archimedische Schraube u. s. w.

200 **Die Quecksilberluftpumpe** von Geißler (1855) ist ein Apparat, mittels dessen man in kleineren Gefäßen den höchsten Grad der Luftverdünnung, der an wahre Luftleere grenzt, erreichen kann, während die Leistungen der gewöhnlichen Luftpumpen weit von der Luftleere entfernt bleiben. Geißler construirte dieselbe zu dem Zwecke, die berühmten Geißler'schen Röhren luftleer zu machen und mit verdünnten Gasen zu erfüllen, wodurch dieselben dem elektrischen Funkenstrome mit prächtigen Lichterscheinungen den Durchgang gestatten. Die Quecksilberluftpumpe besteht fast ganz aus Quecksilber und Glas, und verdankt daher nur der großen Geschicklichkeit der jetzigen Glasbläser ihr Dasein. Sie beruht auf dem Grundgedanken des Torricelli'schen Versuches. Eine Barometerröhre ab bildet mit dem Gefäße ac (Fig. 106) ein Ganzes und steht durch den Gummischlauch bd mit dem oben offenen Gefäß de in Verbindung. Der doppelt durchbohrte Hahn h bringt das Gefäß ac bald mit der Geißler'schen Röhre G, welche leer zu pumpen ist, bald mit dem offenen Gefäß i in Verbindung, oder schließt dasselbe ganz ab. Ist das letztere der Fall und biegt man das Gefäß de ganz herab, so muß das Quecksilber in ac fallen, ac muß luftleer werden, weil ab etwa 80ᶜᵐ hoch ist. Wird nun G mit ac in Verbindung gebracht, so wird die Luft in G verdünnt, und wird endlich das Gefäß de wieder gehoben, während ac von der Geißler'schen Röhre abgeschlossen, aber mit i verbunden ist, so steigt das Quecksilber wieder in die frühere Lage herauf, füllt ac ganz aus und treibt die Luft durch

hinaus. Durch öftere Wiederholung dieses Spieles wird endlich G nahezu luftleer. Das Gefäß s dient zum Reinigen der Luft, o zum Herbeiführen einer fremden Gasart, m ist eine Barometerprobe zum Messen der Verdünnung. Diese älteste Einrichtung der Quecksilberluftpumpe, mit welcher Geißler z. B. auf der Gießener Naturforscherversammlung (1864) arbeitete, hat zahlreiche Veränderungen und Verbesserungen erfahren, besonders von Morren, Jolly und Poggendorff. Geißler hatte auf der Pariser Industrie-Ausstellung (1867) Röhren ausgestellt, die so leer waren, daß der elektrische Funke eines riesigen Inductors von Ruhmkorff selbst in einem Abstande der zwei Platinspitzen von 1mm nicht mehr überzuspringen vermochte.

201 **Mariottes Flasche.** Geht in eine gefüllte Flasche luftdicht durch den Kork eine Röhre bis zu einer gewissen Tiefe ad (Fig. 107), so wirkt in der ganzen horizontalen Ebene ad, welche durch die Mündung der Röhre geht, der Luftdruck nach unten und nach oben, der Luftdruck nach oben trägt das Wasser über dieser Ebene; ist dann nahe am Boden eine Oeffnung c, so pflanzt sich der Luftdruck nach unten bis dahin fort, noch vermehrt durch das Gewicht des Wassers zwischen der Mündung und der Oeffnung. Nun wirkt aber von außen herein durch die Oeffnung c ebenfalls der Luftdruck und zwar nach oben, wodurch der von der Röhrenmündung her fortgepflanzte Luftdruck nach unten aufgehoben wird. Es fließt daher das Wasser nur durch die Druckhöhe dc zwischen der Mündung und der Oeffnung aus; dieser Druck bleibt aber immer derselbe, so lange noch Wasser über der Höhe der Mündung steht; daher ist eine solche Flasche, Mariotte'sche Flasche, nach ihrem Erfinder benannt, zu Versuchen über die Ausflußgeschwindigkeit geeignet. Eine nützliche Anwendung hat dieselbe in dem beständigen Filter, Fig. 107, in welchem die Ausflußöffnung c durch einen Schenkelheber ersetzt ist, dessen äußere Oeffnung etwas unter ab in einen Filtertrichter geht; ist das Wasser bis ab in das Filter gestiegen, so hört der Ausfluß auf, beginnt aber sogleich wieder, wenn dieses Wasser sinkt, so daß der Spiegel constant bleibt, so lange die innere Oeffnung des Hebers eintaucht. — Besonders interessant ist die Mariotte'sche Flasche auch dadurch, daß in derselben der Druck des Wassers über der Höhe ab der Röhrenmündung ganz aufgehoben ist und zwar durch den aus der Röhrenmündung tretenden Luftdruck nach oben, wodurch uns diese Erscheinung das Vorhandensein des Luftdruckes nach oben erkennen läßt.

Fig. 107.

202 **Der Auftrieb des Luftdruckes, der Luftballon.** Da die Luftarten mit den flüssigen Körpern in der leichten Beweglichkeit der Theilchen übereinstimmen, so gilt für dieselben auch das Gesetz des Auftriebes, das Archimedische Princip. Jeder Körper verliert in der Luft so viel an seinem Gewichte, als die verdrängte Luftmenge wiegt. Man kann dies nachweisen mittels des Wagmanometers oder Dasymeters ($\delta\alpha\sigma\acute{\upsilon}\varsigma$ = dicht). Dasselbe besteht aus einer kleinen Wage, die statt der Schalen eine große und eine kleine Kugel trägt und mit denselben im Gleichgewichte ist. Wenn nun das Archimedische Princip für die Luft Geltung hat, so muß die größere Kugel in der Luft mehr von ihrem Gewichte verlieren als die kleinere; und die Kugeln, die mit diesem Verluste sich das Gleichgewicht halten, können dies ohne den Verlust nicht mehr, weil die größere Kugel durch Beseitigung des Verlustes mehr gewinnt als die kleinere; also muß die erstere an sich mehr wiegen als die letztere. Diese Folgerung aus der Geltung des Archimedischen Princips bewährt sich vollkommen; denn bringt man den Apparat unter die Glocke einer Luftpumpe und pumpt dieselbe allmälig leer, so sinkt die größere Kugel um so mehr, je dünner die Luft durch das Auspumpen wird. Es kann daher dieser Apparat auch zum Abschätzen der Dichte oder der Dünne der Luft dienen, woraus sich seine Namen erklären. — Wenn nun, wie aus diesem Ver=

suche folgt, ein Körper in der Luft einen Gewichtsverlust erfährt, so muß er auch einem Drucke von unten nach oben, einem Auftriebe ausgesetzt sein, wie wir auch schon an der Mariotte'schen Flasche wahrnahmen; und dieser Auftrieb muß nach dem Archimedischen Princip gleich dem Gewichte des verdrängten Luftvolumens sein. Körper, welche eben so schwer sind wie die Luft, müssen in derselben schweben, wie wohl manche Dunstbläschen von Nebel und Wolken; Körper, welche leichter sind als die Luft, müssen in derselben aufwärts steigen. Man kann dies zeigen an Seifenblasen, Ballonen von Kautschuk, Collodium, Goldschlägerhaut oder Schafhäutchen, die mit Wasser gefüllt, lebhaft aufsteigen, an kleinen Papierballonen oder den Matten von Elsenraupen, an deren unterer Oeffnung ein Schwämmchen mit Spiritus durch Eisendraht befestigt und angezündet wird; die Luft in den Ballonen wird dann heiß, dehnt sich aus, wird dadurch leichter und verdrängt einen Theil der Luft, wonach der Ballon so leicht ist, daß er rasch in die Höhe steigt. Hierauf beruhen die Luftballone, erfunden von Gebrüder Montgolfier in Anonay 1782.

Ein Luftballon besteht aus einer, gewöhnlich nahezu kugelförmigen Hülle von leichtem, aber starkem Zeuge, welche mit einem sehr leichten Gas, erwärmter Luft, Wasserstoffgas, erfüllt ist. Die Steigkraft des Ballons ist gleich dem Gewichte der verdrängten Luft weniger dem Gewichte des Ballons. Ist d der Durchmesser des Ballons in Centimeter, s und s' das spec. Gew. der Luft und des angewandten Gases und a das Gewicht von 1^{qcm} des Hüllenstoffes, so ist die Steigkraft $= \frac{1}{6}d^3\pi . s - (\frac{1}{6}d^3\pi . s' + d^2\pi . a) = \frac{1}{6}d^3\pi (s - s') - ad^2\pi$. — Montgolfier wandte erwärmte Luft an, indem er unter dem unten offen gelassenen Ballon ein Strohfeuer anzündete; daher werden Ballone mit erwärmter Luft Montgolfièren genannt. Charles schlug sogleich das vortheilhafteste, weil leichteste Gas, das Wasserstoffgas vor, und stieg mit einem mit Wasserstoff gefüllten Ballon, einer sogenannten Charlière, am 1. Dec. 1783 von den Tuilerien in Anwesenheit des Hofes und mehrerer Hunderttausende von bewundernden Zuschauern in einer an dem Ballon hängenden Gondel auf. Die Charlièren haben zwar die größte Steigkraft, aber sind kostspielig und unzuverlässig. Denn der Wasserstoff diffundirt am stärksten durch die Hülle, wodurch die große Steigkraft bald gering wird und der Ballon sinkt; auch dehnt sich das Gas stark aus, wenn der Ballon in Höhen von geringerem Drucke gestiegen ist, und droht, durch seine Spannung den Ballon zu zerreißen; man darf daher den Ballon nicht ganz mit Wasserstoff füllen und muß ihn unten offen lassen, damit überflüssiges Gas entweiche; auch muß oben eine Klappe angebracht sein, um Gas herauslassen zu können, wenn das Herablassen beabsichtigt wird; und für den Fall zu starken Gasverlustes muß Ballast, aus Sandsäcken bestehend, mitgenommen werden, um zu rasches Sinken zu verhindern oder neues Steigen zu veranlassen. Solche Gas- und Ballastverluste sind aber auf einer Luftfahrt nicht wieder zu ersetzen, wodurch das Lenken in verticaler Richtung unmöglich wird. Diese Nachtheile haben die Montgolfièren nicht; denn man kann bei diesen durch Schüren oder Schwächen des Feuers nach Belieben Steigen und Sinken hervorrufen. Deßhalb verband auch Pilatre de Rozier, der schon vor Charles zweimal aufgestiegen war, eine kleine Montgolfière mit einer größeren Charlière, um die größere Steigkraft der letzteren mit der leichteren Lenkbarkeit der ersteren zu vereinigen, büßte aber bei dem Versuche, mit einer solchen Carolo-Montgolfière nach England zu reisen, in entsetzlicher Weise das Leben ein; auch Graf Zambeccari hatte kein Glück mit dieser Verbindung. Man hat wegen der Feuergefährlichkeit und der geringen Steigkraft die Montgolfièren trotz ihrer sonstigen Vorzüge verlassen und füllt jetzt die Ballone mit Leuchtgas nach dem Vorgange des Engländers Green, der in neuerer Zeit die meisten Luftfahrten gemacht hat und auf einer derselben in 19 Stunden von London nach Weilburg kam. Das Leuchtgas ist zwar nur halb so schwer als die atm. Luft, besitzt aber doch noch Steigkraft genug für die Schau- und Vergnügungszwecke, denen die Ballone meist gewidmet sind; sie müssen nur hinreichend groß sein, dann resultirt auch einem weniger leichten Gas eine größere und dauernde Steigkraft, weil die Steigkraft nahezu mit der dritten Potenz, die Diffusion aber nur mit der zweiten Potenz des Durchmessers wächst. Der größte Ballon, mit dem je Fahrten unternommen wurden, war „der Riese" von Nadar, der aus zwei über einander stehenden Ballonen bestand, 6000^{cbm} Gas faßte und 45^m hoch war, fast so hoch wie ein Kirchthurm; wegen dieser Größe konnten zweitägige Fahrten mit dem Riesen unternommen werden; die Gondel enthielt 2 Cajüten für Capitän und Passagiere, 1 Gepäckraum, 1 Provisionskammer, Waschraum, Photographie und Druckerei, 35—40 Personen konnten mitfahren; sie war aus Weiden geflochten, außen mit Seilen und innen mit Kautschuk überzogen, 4^m lang, $2{,}3^m$ breit und 3^m hoch, ungefähr wie ein Eisenbahnwagen. Auf der größten Reise, die Nadar unter Oberleitung der Ge-

brüder Godard unternahm, und auf welcher er am 18. Oct. 1863 Nachmittags 5 Uhr in Paris aufstieg und über Belgien und Holland fliegend am 18. Oct. Morgens 10 Uhr bei Rethem an der Aller im Hannöver'schen niederfiel, versagte das Ventil, die Ankertaue rissen und die Gondel wurde lange Strecken über Wald und Feld geschleift, auf- und abgestoßen, so daß einige von den 9 Reisenden schwer verwundet wurden. Am 15. April 1875 unternahmen Croce-Spinelli, Sivel und Tissandier in Paris eine Luftfahrt zu wissenschaftlichen Zwecken; in einer Höhe von 8000^m erstickten die beiden ersteren, obwohl sie aus mitgenommenen Sauerstoffschläuchen athmeten. Glaisher und Coxwell hatten 1862 schon 11000^m Höhe erreicht, wobei ersterer bewußtlos wurde und letzterem eine Hand erfror. So sind die Luftfahrten noch immer lebensgefährliche Wagnisse.

Nützlich sind die Ballone, außer einigen Verwendungen zu Kriegszwecken (Fleurus 1794, Venedig 1849, Paris 1870), noch nicht geworden, weil man sie noch nicht in horizontaler Richtung zu lenken versteht. Gleich nach der Erfindung wurden schon Versuche gemacht, mit Schaufelrädern und schaufelartigen Flügeln die Gondel und damit auch den Ballon nach verschiedenen Richtungen zu lenken; man fand, — was auch die Rechnung ergibt, daß bei ganz ruhiger Luft einige Menschen dem Ballon mit solchen Einrichtungen eine wagrechte Geschwindigkeit von ca. 1^m ertheilen können. Dasselbe haben neuere unter Leitung von Helmholtz angestellte, durch die deutsche Reichsregierung veranlaßte Versuche ergeben, sowie die Versuche von Paul Hänlein aus Mainz, der einen Ballon durch eine von einem Gasmotor getriebene Schiffsschraube fortbewegte. Um größere Geschwindigkeiten zu erzielen, müßte, wie die Rechnung ergibt, die Kraft mit der neunten Potenz der Geschwindigkeit im Verhältnisse stehen, also für eine Geschwindigkeit von 3^m 19683mal größer werden. Man müßte für größere Geschwindigkeiten eine Kraftmaschine mitnehmen; dafür müßte wiederum die Steigkraft, also auch der Ballon größer werden, für dessen Bewegung auch die Kraft wieder wachsen würde. In dieser Weise potenziren sich die Verhältnisse gegenseitig, so daß selbst für vollkommen ruhige Luft auch die Anwendung der compendiösesten Gasmaschine zum Treiben eines Schraubenrades wenig Erfolg verspricht. Noch weniger möglich erscheint aber die Lenkung in bewegter Luft; und die Luft ist fast immer in sehr lebhaften Strömungen begriffen, wie Greens und Nadars rasche Fahrten zeigen, sowie der Ballon, der am 16. Dec. 1804 in 22 Stunden von Paris nach Rom flog. Wären diese Strömungen constant und in verschiedenen Höhen in bestimmter Weise verschieden gerichtet, so könnte man dieselben zu Fahrten benutzen, indem man sich zu der Luftschicht erhöbe, welche gerade die beabsichtigte Richtung hätte, oder man könnte auch die verschiedenen Richtungen combiniren; allein die Luftströme sind wechselnd und unregelmäßig, zur einen Zeit von einer Richtung durch bedeutende Höhen, zu einer anderen Zeit schon in geringen Abständen verschieden. Wollte man gar den Strömungen entgegenfahren, so müßten ungeheure Kräfte zu Gebote stehen; denn die Ströme haben eine durchschnittliche Geschwindigkeit von 10^m, haben also gegen den Ballon, wenn derselbe mit der Locomotive wetteifern und eine Geschwindigkeit von 12^m erreichen soll, eine relative Widerstandsgeschwindigkeit von 22^m; bei solchen großen Geschwindigkeiten aber wächst der Widerstand nicht blos mit der ersten, sondern auch mit der zweiten und dritten Potenz der Geschwindigkeit, wodurch die Kräfte zur Ueberwindung unaufbringlich werden. Nur dann würde wohl die Lenkung erreichbar scheinen, wenn es gelänge, luftleere Räume an den Seiten eines Luftschiffes herzustellen, um durch den Luftdruck selbst das Schiff nach diesen Seiten voranschieben zu lassen.

Wissenschaftliche Luftfahrten wurden unternommen von Biot und Gay-Lussac am 24. Aug. 1804, von Gay-Lussac allein am 16. Sept. 1804, wobei derselbe eine Höhe von 7000^m erreichte, von Barral und Bixio am 27. Juli 1850, von der Sternwarte zu Kew im Jahre 1852, von Glaisher unter den Auspicien der „British Association", von 1862 an mehr als 25. Es wurden hierbei besonders beachtet die Abnahme des Luftdruckes und der Temperatur mit der Höhe, die Luftströmungen und sonstige Wettererscheinungen, die Electricität der Atmosphäre u. s. w.

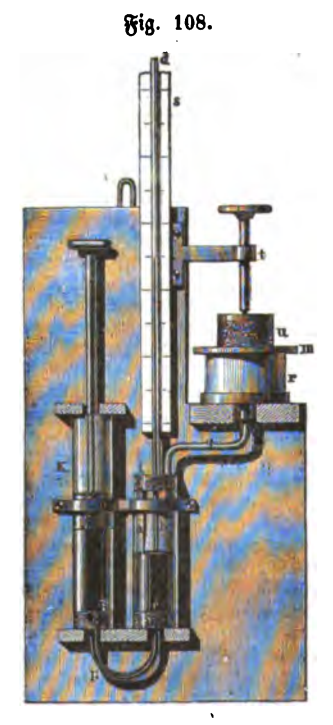
Aufg. 328. Wieviel Flüssigkeit fließt per Secunde aus einem Schenkelheber von 2^{cm} Durchmesser, wenn der innere Schenkel 20^{cm} frei und der äußere 1^m hoch ist? Aufl.: $0{,}001256^{cbm}$. — Aufg. 329. Wie hoch muß der innere Schenkel frei sein, wenn nur $0{,}001^{cbm}$ ausfließen soll? Aufl.: 49^{cm}. — A. 330. Welchen Druck muß der Kolben einer Saugpumpe beim Hube ausüben, wenn die Entfernung des Ausflußrohres vom Wasserspiegel $= d$ ist? Aud.: Sei die Entfernung dieses Rohres vom Kolben $= y^m$, so drücken auf den Kolben nach unten $10 + y^m$, nach oben $10 - (d - y)$; folglich Restdruck nach unten $= d^m$ Wasser $= 1000 d^{kg}$ per qm. — A. 331. Welcher Effect muß bei dieser Pumpe verwendet werden, wenn jede Secunde ein Kolbenhub von der Höhe h stattfindet? Aufl.: $\frac{1}{75} \cdot 1000 dh$ Pferde. — A. 332. Wie groß ist der Effect, wenn $d = 5^m$, $h = 1^m$ und die Kolbenfläche $= 1^{qdm}$? Aufl.: $\frac{2}{3}°$. — A. 333. Ist der bei der Druckpumpe nöthige

Kolbendruck ein anderer? Aufl.: Ebenfalls 1000dkg per qm; nur ist der Druck auf Hub und Schub vertheilt. — A. 334. Welche Wassermenge gibt die Pumpe (A. 332) in 1 Sec.? Aufl.: 1000hkg per qm; hier per qdm = 10kg. — A. 335. Wie groß ist der Gewichtsverlust eines Würfels von 1m Kante in der Luft? Aufl.: 1293g. — A. 336. Was wiegen Kugeln von Blei und Lindenholz im luftleeren Raume, wenn sie in der Luft 2 Ctr. wiegen. Aufl.: 99988g, 98741g. — A. 337. Welches ist der Auftrieb einer Kugel von 20m Durchmesser in der Luft? Aufl.: 5416kg. — A. 338. Wie groß ist die Steigkraft einer Charlière von 10m Durchmesser? Aufl.: 630kg. — A. 339. Wie groß, wenn der qm Taffet 200g wiegt? Aufl.: 567kg. — A. 340. Welchen Durchmesser muß eine solche Charlière haben, damit sie 1870kg tragen und noch 100kg Steigkraft haben kann? Anb.: $^1/_6 d^2\pi.(s-s')$ — $ad^2\pi$ — 1 870 000 = 100 000; woraus d ungefähr = 15m. — A. 341. Wie groß ist die Steigkraft einer Greenière von 10m Durchmesser, sp. G. des Gases = 0,6? Aufl.: 270kg.

3. Anwendung der Ausdehnsamkeit und des Mariotte'schen Gesetzes.

204 **Der Heronsball** (Heron von Alexandrien 210 v. Chr.). Der Heronsball besteht aus einem theilweise mit Flüssigkeit gefüllten, luftdicht geschlossenen Gefäße, in welches von außen eine bis in die Flüssigkeit gehende Röhre hineinführt. Wird durch diese Röhre Luft eingeblasen, so steigt dieselbe aus der Flüssigkeit in den Luftraum des Gefäßes; hierdurch wird die Luft verdichtet und erhält nach dem Mariotte'schen Gesetze eine größere Spannung. Vermöge dieser Spannung übt die eingeschlossene Luft, wenn das Einblasen unterbrochen wird, einen stärkeren Druck auf das Wasser aus als die äußere Luft; daher muß das Wasser in der Röhre steigen und, wenn der Druck stark genug ist, aus der Röhre ausspritzen.

Fig. 108.



Der Heronsball findet Anwendung: 1. In der Feuerspritze; dieselbe besteht aus zwei Druckpumpen, welche das Wasser abwechselnd in einen Heronsball, Windkessel genannt, eintreiben, wodurch die Luft über dem Wasser immer mehr verdichtet wird und endlich einen so großen Druck ausübt, daß sie das Wasser aus der Röhre, die in den sogenannten Schwanenhals endet oder in einen Schlauch übergeht, haushoch emportreibt. 2. Zu Springbrunnen mit Windkessel, welche wie die Feuerspritze eingerichtet sind und auch zum Aufsteigen von Flüssigkeiten in Fabrikgebäuden benutzt werden. 3. Zu der Spritzflasche der Chemiker und Apotheker; dieselbe hat eine Einblase- und eine Spritzröhre, wodurch das Einblasen und Spritzen gleichzeitig und dauernd möglich wird. 4. Er erklärt die Geiser (mit Ausnahme des großen), intermittirende heiße Springbrunnen auf der Insel Island, in welchen das Wasser dann steigt, wenn sich durch den Einfluß vulkanischer Hitze Dampf genug über denselben gebildet hat. 5. Im Heronsbrunnen, einem Heronsball, dessen ausspritzendes Wasser in ein Becken fällt, welches durch eine Röhre mit einem zweiten geschlossenen Gefäße verbunden ist, so daß die in demselben verdichtete Luft durch eine zweite Röhre in den Luftraum des Heronsballes steigt und dadurch das Ausspritzen permanent macht.

205 **Das Volumenometer** (Kopp 1840). Dieser Apparat (Fig. 108) dient zum Bestimmen des Volumens kleiner, pulveriger, faseriger u. dergl. Körper. Man kennt das Volumen v der Luft, welche bei dem Barometerstande h das Gefäß r, die Röhre q und den Cylinder ii vollständig erfüllt, wobei das Quecksilber sich noch in dem Cylinder k befindet und blos bis an die Bodenöffnung des Cylinders ii reicht. Wird nun der Kolben in k niedergedrückt und steigt hierdurch das Quecksilber in ii bis an die Spitze des Platinstiftes a, so wird die Luft verdichtet bis zu dem Volumen v'. Ihre Spannung

wächst hierdurch um einen Betrag, der durch die Höhe der Quecksilbersäule in der Barometerröhre cd gemessen wird und $1/_n$ h sein möge. Folglich ist nach dem Mariotte'schen Gesetze $v : v' = h + 1/_n h : h$, woraus $v - v' = v : (n + 1)$. — Bringt man nun den zu untersuchenden Körper, dessen Volumen = x sei, in das Gefäß r und verfährt ganz in der eben beschriebenen Weise, so ist $v - x$ das anfängliche und $v' - x$ das spätere Volumen der eingeschlossenen Luft. Für das letztere Volumen aber wird das Quecksilber in der Barometerröhre an einem anderen Punkte stehen als bei dem ersten Versuche, weil zum Comprimiren der geringeren Luftmenge eine andere Kraft als bei dem ersten Versuche erforderlich ist; es sei der jetzige Zuwachs der Spannung $1/_m h$, so ist $v - x : v - v' = h + 1/_m h : 1/_m h$. Substituirt man hierin den obigen Werth für $v - v'$, so ergibt sich das gesuchte Volumen $x = (n - m) v : (n + 1)$. Auch Regnault und noch früher Say haben Apparate zu demselben Zwecke construirt, Stereometer genannt, welche aber hinter Kopps Volumenometer zurückstehen. Der linke Theil des Apparates kann auch zur Messung des Luftdruckes benutzt werden und heißt in diesem Falle Differentialbarometer; hierbei muß die Verbindung mit r unterbrochen und i luftdicht geschlossen werden. Bezeichnet hier v und v' das Volumen der Luft im Cylinder vor und nach dem Niederschieben des Kolbens, b den Barometerstand und h das Steigen des Quecksilbers in der Röhre d, so ist $v : v' = b + h : b$, woraus man b berechnen kann $= v'h : (v - v')$. Da v und v' constant und bekannt sind, so hat man nur den bekannten Quotient $v' : (v - v')$ mit dem jeweiligen h zu multipliciren, um den Barometerstand zu finden. Dieses Barometer bedarf zwar für jede Beobachtung eines Verschiebens des Kolbens, ist aber sehr compendiös.

206 **Das Manometer** (μάνος = dünn) ist ein Apparat zum Messen der Spannung von Luftarten, besonders von heißen Dämpfen. Das offene Quecksilbermanometer besteht aus einem Quecksilber enthaltenden Eisenkasten, in welchen eine Röhre die verdichteten Gase über das Quecksilber führt, während eine zweite gläserne Röhre in das Quecksilber taucht; die Gase treiben das Quecksilber in dieser Röhre 1 . 76, 2 . 76, 3 . 76cm u. s. w. hoch, wenn die Spannung 2, 3, 4 u. s. w. Atmosphären beträgt; daher müssen offene Manometer unhandlich hoch sein. Man hat deßhalb die Manometerröhre oben geschlossen; dann verdichtet sich über dem steigenden Quecksilber die Luft; es kann daher das Quecksilber nur so hoch steigen, daß das Gewicht seiner Säule und die Spannung der verdichteten Luft zusammen der zu messenden Spannung gleich sind; nach diesem Grundsatze ist die hinter der Röhre angebrachte Skale eingetheilt. Noch bequemer sind die Metallmanometer, die den Metallbarometern ähnlich sind. Das Röhrenmanometer von Schinz, gewöhnlich nach Bourdon genannt, enthält wie das Metallic eine kreisförmig gebogene Röhre, deren eines Ende mit dem Dampfe communicirt, während das zweite, freie und geschlossene Ende auf einen Zeiger wirkt und seine durch den Dampfdruck erzeugte Bewegung demselben mittheilt. Bei dem Plattenmanometer von Schäffer und Budenberg wirkt der Dampf wie bei dem Holosteric auf eine cannelirte Platte, welche dadurch je nach dem Dampfdrucke eine mehr oder minder große Einbiegung erleidet, die auf einen Zeiger übertragen wird. Die einfachsten, jedoch nur für geringe Spannungen brauchbaren Manometer sind die doppelt gebogenen Sicherheitsröhren.

Die Gebläse sind Vorrichtungen zum Einblasen von Luft, gewöhnlich zu dem Zwecke der Verstärkung des Feuers. In irgend einem Raume wird Luft verdichtet und dieser Raum dann durch eine Röhre mit dem Feuer verbunden, so daß die verdichtete Luft durch ihre Spannung in dasselbe strömt. Wenn nämlich die Spannung der eingeschlossenen Luft größer wird, so wird auch ihre Ausdehnsamkeit größer, während die äußere Luft die geringere Ausdehnsamkeit besitzt, die dem Luftdrucke entspricht; folglich muß aus dem Verdichtungsraume so lange Luft ausströmen, bis beiderseits die Spannung dieselbe ist. Das einfachste Gebläse ist der einfache Blasebalg, aus zwei Brettchen bestehend, die mit gefaltetem Leder einen veränderlichen Raum einschließen, von dessen schmalem Ende eine Röhre ausgeht. Werden die Brettchen aus einander gezogen, so wird der Raum größer und die Luft dünner; die äußere Luft strömt dann durch die Röhre ein. Werden die Platten zusammengedrückt, so wird der Raum kleiner und die Luft dichter; sie strömt dann durch die Röhre aus. Besser ist es, wenn an der einen Platte ein sich nach innen öffnendes Ventil angebracht ist. Besteht der Blasebalg aus zwei durch ein zweites Ventil verbundenen Theilen, so strömt die Luft mehr ununterbrochen aus. In dem Cylindergebläse wird die Luft durch einen hin- und hergehenden Kolben verdichtet und in dem Trommelgebläse und Ventilator durch die rasche Bewegung der Schaufeln eines in einem Gehäuse sich drehenden Schaufelrades.

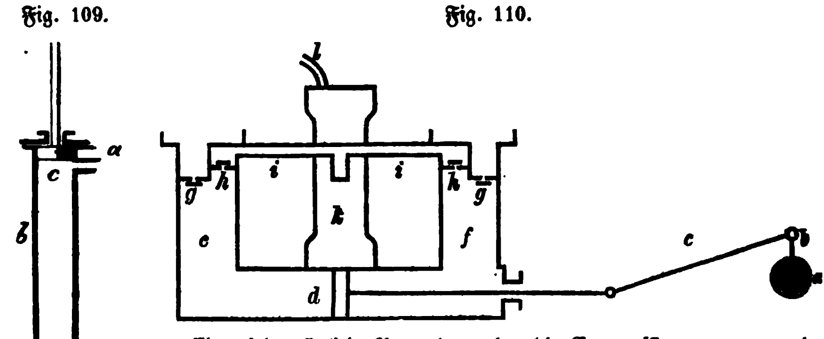
207 **Die Gasometer** sind Vorrichtungen zum Aufsammeln von Gasen. Bei dem Glockengasometer strömt das Gas durch eine Röhre in eine schwimmende Glocke, hebt durch seine Spannung die Glocke immer mehr aus dem Wasser und schafft sich so selbst seinen Raum; wird der Hahn dieser Röhre geschlossen und der einer zweiten ins Freie führenden Röhre

geöffnet, so drückt das Gewicht der Glocke das Gas zusammen und dieses muß ausströmen. Die Gefäßgasometer der Chemiker beruhen auf dem Auftriebe, auf dem Emporsteigen von Luft in Wasser.

208 **Das Athmen.** Bei dem Ausathmen werden die Rippen gesenkt und das Zwerchfell gehoben; dadurch wird der Brustkasten verengt und die Luft in den Lungen verdichtet, wonach dieselbe ins Freie strömen muß. Das Einathmen geschieht durch den Luftdruck; das Zwerchfell wird gesenkt, die Rippen werden gehoben, dadurch wird der Brustkorb erweitert und die Luft in den Lungen verdünnt; die äußere Luft strömt durch ihre vom Luftdruck erzeugte Spannung in die Lungen. Durch sehr starke Erweiterung kann man viel Luft einnehmen und dieselbe dann durch allmäliges Verengern langsam ausströmen lassen, worauf das Blasen z. B. mit dem Löthrohre beruht.

209 **Die Compressionspumpe** (Fig. 109) hat den Zweck, in einem beliebigen Raume r ein Gas, das durch die Röhre a herbeiströmt, zu verdichten. Sie besteht aus einem Stiefel b mit einem Kolben c; das Einmündungsrohr a muß eine solche Lage haben, daß es beim Herabgehen des Kolbens sogleich von dem Hauptraume des Stiefels abgeschlossen wird. Hierdurch verdichtet sich das eingeströmte Gas oder die Luft, drückt das nach außen sich öffnende Ventil auf und strömt in den Raum r. Bei dem Rückgange des Kolbens wird die Luft über dem Ventil dünner, daher wird das Ventil durch die verdichtete Luft in r geschlossen und läßt das eingetretene Gas nicht wieder zurücktreten. Man wendet die Compressionspumpe an bei Taucherglocken, bei Aquarien, bei Windbüchsen, an welchen das durch eine Feder angedrückte Ventil für einen Augenblick durch das Anziehen des Hahnes geöffnet wird, besonders aber zu Versuchen über die Condensation der Gase. Man bedient sich hierzu vorwiegend des Apparates von Natterer (1840), an welchem der Raum r eine sehr dickwandige Flasche von Schmiedeeisen ist und der Kolben durch ein Kurbelrad hin und hergeführt wird. Mit diesem Apparat kann man die meisten Gase flüssig machen, Salzsäure bei 25, Stickoxydul bei 31, Kohlendioxyd bei 37, Aethylen C_2H_4 bei 43 Atmosphären Druck und einer Temperatur von etwa 0° C, die durch um die Flasche gelegtes Eis herbeigeführt wird.

Fig. 109. Fig. 110.



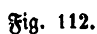
Eine sehr nützliche Anwendung hat die Compressionspumpe an den großen Gebirgstunnels des Mont-Cenis und des St. Gotthardt gefunden; man setzt nämlich bei diesen Werken die Gesteinsbohrer nicht mittels Dampfmaschinen, sondern mittels Luftmaschinen in Thätigkeit, weil jene Luft verzehren und Rauch erzeugen, diese aber gleichzeitig zur Lufterneuerung dienen können. Die Luftmaschinen haben ganz dieselbe Einrichtung wie die Dampfmaschinen, nur werden sie statt des Dampfes mit comprimirter Luft von 5 Atm. Spannung getrieben. Die Compressionspumpe ist in Fig. 110 schematisch dargestellt; a ist die Welle, die von einem Wasserrad umgedreht wird, und welche mittels Kurbel b und Pläuelstange c den Kolben d im Stiefel hin- und herbewegt, wodurch die Luft in den beiden Cylindern e und f, in ersterem beim Schub, in letzterem beim Hub verdichtet wird. Geht der Kolben nach rechts, so schließt sich in e das Druckventil h, während das Saugventil g sich öffnet und Luft aus der Atmosphäre einläßt; dagegen schließt sich in f das Saugventil g, während sich das Druckventil h öffnet und die verdichtete Luft durch das

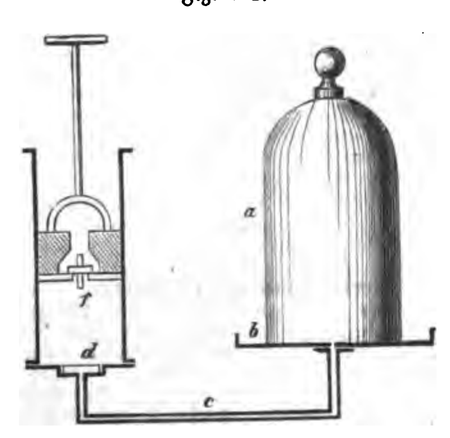
Rohr i in das Gefäß k führt, wo sie unter dem Drucke einer 50m hohen Wassersäule auf ihrer Spannung von 5 Atm. erhalten wird. Durch eine Röhrenleitung *l* strömt nun diese Luft in den Tunnel bis zu den Bohrwagen, wo sie die genannten Luftmaschinen treibt; diese haben nicht nur die Bohrwagen vorwärts und zurück zu bewegen, sondern auch die Bohrer in das Gestein zu stoßen, darin zu drehen und vorwärts zu schieben, wenn das Bohrloch tiefer geworden ist. In Fig. 111 ist der wesentliche Theil einer Bohrstoßmaschine skizzirt, woraus zu erkennen ist, wie der Bohrer rasch vorangestoßen und langsam zurückgeführt wird, und wie die verdichtete Luft selbst den Schieber bewegt. Eine Luftmaschine eingerichtet wie eine Dampfmaschine, versetzt die Welle a in Umdrehung, welche außer anderen Bewegungen die Drehung des schiefen Rades b zu vollbringen hat;

Fig. 111.

gegen dasselbe drückt die in dem Schiebkasten c immer vorhandene verdichtete Luft die Schieberstange d, so daß der Schieber s in der gezeichneten Stellung die äußerste Lage links einnimmt, und die verdichtete Luft durch den Kanal e hinter den Kolben g strömen und durch ihren Druck auf dessen große Hinterfläche voranstoßen kann. Es schadet nichts, daß der Raum vor dem Kolben mit dem Schiebkasten in freier Verbindung steht und demnach ebenfalls mit verdichteter Luft erfüllt ist; denn diese kann nur auf die kleine Vorderfläche des Kolbens wirken. Der geringere Druck auf dieselbe reicht jedoch zur langsamen Rückbewegung des Kolbens aus; denn gleichzeitig mit dem Vorangange desselben hat sich das Rad b halb gedreht, die Luft hat den Schieber in die äußerste Stellung rechts geführt und dadurch den Kanal e geschlossen, während der Hohlraum des Schiebers mit dem in die freie Luft gehenden Hohlraume der Cylinderwand communicirt; und in den Hohlraum des Schiebers kann jetzt, da der Kolben seine äußerste Stellung links hat, die Luft hinter dem Kolben strömen, so daß hinter dem Kolben nur 1 Atm. Druck vorhanden ist; folglich kann jetzt der Druck der verdichteten Luft vor dem Kolben, da er nur auf eine kleine Kolbenfläche wirkt, den Kolben langsam zurücktreiben. Die übrigen nicht weniger interessanten Theile der Tunnelmaschine müssen wir übergehen.

210 **Die Luftpumpe** (Otto von Guericke, Bürgermeister von Magdeburg 1650) hat den Zweck, Räume luftleer, oder besser gesagt, luftverdünnt zu pumpen; am häufigsten benutzt man Glasglocken a, Recipienten genannt, welche mit dem abgeschliffenen und mit Schmiere versehenen Rande auf den ebenen und abgeschliffenen Teller b gesetzt werden, wodurch sie mittelst der Röhre c mit der eigentlichen Luftpumpe in Verbindung stehen. Diese hat dieselbe Einrichtung und dieselbe Wirkungsweise wie die Saugpumpe. Bei dem Kolbenhube schließt sich das Kolbenventil f, das Bodenventil d hebt sich, wodurch die Luft in dem Recipienten verdünnt wird; bei dem Kolbenschube schließt sich das Bodenventil, wodurch die Luft in dem Recipienten ihre Verdünnung behält, während die Luft in dem Stiefel durch das gehobene Kolbenventil entweicht. Durch öftere Wiederholung wird die Luft in der Glocke immer dünner, bis sie endlich so dünn ist, daß ihre Spannung das Ventil d nicht mehr heben kann, womit die Wirksamkeit derselben zu Ende ist. Um diesen


Fig. 112.



Nachtheil zu beseitigen, wendet man Blasenventile an, weil diese nur geringer Kraft zum Heben bedürfen, oder man befestigt das an der Seite des Bodens sitzende Kegelventil an einer durch den Kolben gehenden Stange, welche von dem Kolben mit nach oben genommen wird, bis ein hoch oben befindlicher Ansatz der Stange gegen den Cylinderdeckel stößt; durch das Heben der Stange wird das Ventil geöffnet und beim Kolbenschube durch die mitgenommene Stange wieder geschlossen. Auch hat man Hähne statt der Ventile, welche indessen von der Hand oder durch einen eigenen Mechanismus gedreht werden müssen.

Keine Luftpumpe aber kann vollkommene Luftleere erzeugen; denn die Wirkung der Luftpumpe besteht nur in einer fortgesetzten Verdünnung, indem das Luftvolumen r des Recipienten sich beim Kolbenhube noch in den Stiefel s ausdehnt, so daß das Volumen auf r + s erhöht und demnach die Dichte in dem Verhältnisse r : (r + s) vermindert wird. Diese Verminderung vergrößert sich bei jedem Hube in demselben Verhältnisse; also beträgt die Dichte nach n Hüben nur noch $r^n : (r + s)^n$ oder $1 : (1 + s/r)^n$, welcher Ausdruck nur dann = 0 wird, wenn n unendlich groß ist; also kann die vollkommenste Pumpe niemals völlige Leere hervorrufen. Nun sind aber die Luftpumpen durchaus nicht vollkommen; sie leiden hauptsächlich an 3 Uebelständen: 1. Die Abschlüsse sind nicht hermetisch, was um so nachtheiliger wirkt, je stärker die Verdünnung ist. 2. Das Schmiermittel absorbirt Luft und diese strömt bei dem Hube in den Verdünnungsraum. Deleuil läßt deßhalb seinen Kolben gar nicht die Cylinderwand berühren, so daß sich zwischen beiden eine dünne Luftschicht befindet, die durch Adhäsion so fest haftet, daß sie sich nicht in den Verdünnungsraum ergießt; diese Maschine bedarf auch weniger Kraft und beseitigt den Nachtheil des Eintrocknens der Schmiere, des Verstopfens der Röhren und Ventile. Auf der großen Ausstellung von 1867 war eine große Deleuil'sche Pumpe, welche einen Raum von 250 Liter Inhalt in ¼ Stunde bis auf 10mm Druck verdünnte, während kleinere Räume auf 1mm herabgetrieben wurden. 3. Der schädliche Raum. Der Kolben schließt nie absolut an den Stiefelboden; auch hebt sich beim Schube das Ventil; in der tiefsten Stellung des Kolbens ist also zwischen den beiden Ventilen ein Raum übrig, der mit äußerer Luft erfüllt ist. Dieser Raum wird der schädliche Raum (v) genannt. Denn beim Hube dehnt sich diese Luft in den Stiefel aus und verdünnt sich hier im Verhältnisse v : s. Hat die Luft in dem Recipienten diesen Grad der Verdünnung erreicht, so hat weiteres Pumpen keinen Erfolg. Ist in Pumpen nicht für Verminderung dieses Nachtheils gesorgt, so wird man unter 3mm Spannung nicht gelangen. Staudinger in Gießen schließt den Stiefel oben und bringt an dem Deckel ein Ventil an, so daß über dem Kolben auch nur verdünnte Luft vorhanden ist, und der schädliche Raum sich daher nur mit solcher füllen kann. In den zweistiefeligen Ventilluftpumpen ist durch Babinets Hahn etwas abgeholfen, weil dieser bei dem Schube den schädlichen Raum mit dem anderen Stiefel verbindet, in welchem gerade der Hub geschieht, so daß der schädliche Raum nur verdünnte Luft enthält. In den zweistiefeligen Hahnluftpumpen verfolgt der Graßmann'sche Hahn denselben Zweck. Hierdurch sind Verdünnungen bis zu 1mm Spannung erreichbar. — Es gibt auch einstiefelige doppeltwirkende Luftpumpen (von Bianchi und Staudinger), in welchen also der Kolben nicht blos beim Hube, sondern auch beim Schube Luft saugt. Der Grad der Verdünnung wird gemessen durch die Barometerprobe, ein nur 20cm hohes Barometer, welches auf die Verbindungsröhre zwischen Stiefel und Teller aufgeschraubt werden kann; das Quecksilber in demselben sinkt erst, wenn die Verdünnung auf ¼ gebracht ist. Die besten Luftpumpen geben nur eine Verdünnung bis zu 1—2mm Quecksilberdruck; weiter kann man mit Sprengels Luftsauger (214.) und mit der Quecksilberluftpumpe (200.) gehen; die Wasserluftpumpe Bunsens (214.) geht bis zur Spannung des aus dem Wasser entstehenden Dampfes, 7—10mm.

211 **Versuche mit der Luftpumpe.** Den Luftdruck zeigen folgende Versuche: 1. Das Festhaften des Recipienten. 2. Das feste Zusammenhalten der Magdeburger Halbkugeln. 3. Das Sprengen einer Blase über einem leergepumpten Gefäße; auch der Seitendruck der Luft ist durch einen ähnlichen Versuch zu zeigen. 4. Der Springbrunnen im luftleeren Raume. 5. Der Quecksilber-Regen. 6. Das Barometer unter einem Recipienten. — Die Ausdehnsamkeit der Luft zeigen: 7. Das Anschwellen und Springen einer Blase unter dem Recipienten. 8. Das Schäumen von Bier, das Aufsteigen von Luftblasen in Wasser, das Umgeben eines Stückes in Wasser liegenden Holzes mit Bläschen. 9. Das Glattwerden eines runzeligen Apfels, das Austreten des Eiweißes aus einer Oeffnung in der Schale. 10. Ein Heronsball spritzt unter der Glocke; stellt man aber seine Spitze in Wasser, so tritt die Luft in Blasen aus, und die Flüssigkeit steigt nach dem Zulassen von Luft in den Ball. 11. Wasser steigt aus einem Gefäße in das andere, wenn dieselben durch ein Knie-

rohr verbunden sind, welches luftdicht in das eine Gefäß geht. Andere interessante Versuche sind: 12. Das Kochen von warmem Wasser unter der Glocke. 13. Das Fallen von Körpern in einer luftleeren Röhre. 14. Das Verlöschen brennender Körper. 15. Das Ersticken kleiner Thiere. 16. Das Nichtentzünden von Pulver durch den Funken. 17. Die schwache Fortpflanzung des Schalles in verdünnter Luft. 18. Das Dasymeter. 19. Das Gefrieren von Wasser durch Aether oder Ammoniak.

So zahlreich die Anwendungen der Luftpumpe in der Physik und Chemie sind, so selten sind sie im Leben. Atmosphärische Eisenbahnen werden wohl noch zu Beförderungen von Briefen und Päcken benutzt, z. B. in London zur raschen Verbindung der Filialposten mit der Hauptpost, haben aber wenig Ausdehnung gefunden; auch in den Zuckerfabriken ist die Luftpumpe nur noch selten in Verwendung; so bleibt nur ihre Verwendung bei dem Imprägniren von Körpern mit Farb- und Gerbstoffen, beim Befeuchten und Trocknen in Fabriken u. dergl.

4. Bewegung der Luftarten.

Die fortschreitenden und drehenden Bewegungen großer Massen unserer Atmosphäre bilden die Winde und Luftströme, die durch die Wärme entstehen und in der Meteorologie betrachtet werden; die schwingenden Bewegungen kleinerer Luftmengen bilden den Schall und werden in der Akustik betrachtet; die Bewegung der einzelnen Luftmoleküle bilden die Luftwärme und gehören daher der Lehre von der Wärme an; diese Molekularbewegungen der Luftarten werden hier nur insofern in's Auge gefaßt, als sie Wirkungen von Luftarten auf feste, flüssige oder andere luftförmige Körper hervorbringen. Außer diesen Molekularwirkungen der Luftarten bleiben hier noch einige specielle Bewegungen kleinerer Luftmengen übrig, das Aufsteigen von Luft in Flüssigkeiten, dann umgekehrt das Mitreißen von Luft durch Ströme flüssiger und luftartiger Körper, und endlich das Ausfließen von Luft aus Gefäßen.

212 **Die Luftblasen.** Die Luftblasen sind Gasmengen, die in Flüssigkeiten vermöge des Auftriebes in die Höhe steigen. Die Spannung einer solchen, frei in einer Flüssigkeit schwebenden Gasmenge muß gleich sein der Spannung der äußeren Luft vermehrt um das Gewicht der Flüssigkeitsäule über der Gasmenge und um die Oberflächenspannung der Flüssigkeitshaut rings um die Gasmenge. Das erste dieser 3 Glieder ist in allen Fällen, das zweite bei kleinen Gasmengen ringsum gleich groß; folglich muß auch, weil die Spannung der Gasmenge nach allen Richtungen dieselbe ist, die Oberflächenspannung ringsum gleich groß sein; dies ist aber nach 170. nur der Fall, wenn die Krümmung ringsum dieselbe ist, d. h. wenn die Gasmenge Kugelform besitzt. Die Luftblasen sind also kugelförmig.

Diese Form ist um so genauer, je kleiner sie sind. Bei großen Blasen ist der Druck der Flüssigkeit von unten her größer als von oben; folglich muß, damit die Gesammtwirkung von unten dieselbe sei, die Oberflächenspannung unten kleiner werden, d. h. die Krümmung muß unten schwächer als oben sein, wodurch die Kugelblase unten etwas abgeplattet erscheint. Besonders deutlich tritt dies an ruhig schwebenden Kugeln z. B. an dem Plateau'schen Tropfen hervor; an steigenden Blasen erfährt die obere Seite einen Widerstand, wodurch auch dort die Form geändert werden kann; dieser Widerstand wächst mit der Dichte der Flüssigkeit und mit der Leichtigkeit der Luftart, so daß eine Blase in Quecksilber sogar oben schwächer wie unten gekrümmt ist. Wird aber der stärkere Druck von unten noch unterstützt durch die Adhäsion einer festen Wand, wie bei dem Aufsteigen von Blasen in Glasröhren, so nimmt nach Melde (1865) die Blase gar Glockenform an; die Basis dieser Glocke zeigt mehrere Ringe, weil die Glocke sich immer neu bildet, und daher immer mehrere Basen von Glocken wegen ihrer weniger leichten Auflöslichkeit übereinander sitzen. Nach Guthries Untersuchungen (1865) wächst die Größe der Blasen unter übrigens gleichen Umständen mit der Dichte der Flüssigkeit, eigentlich aber mit der Steifigkeit derselben, welche bei dichteren Flüssigkeiten größer wird, während die Festigkeit einer Flüssigkeit die Größe der Blasen zu vermindern strebt. — An eingetauchten Körpern sowie an Gefäßwänden haften kleine Bläschen, weil von der Berührungsstelle aus kein hydrostatischer Druck stattfindet, also der auf die entgegengesetzte Stelle nicht aufgehoben ist und

daher das kleine Kügelchen, das durch seine große Oberflächenspannung seine Stabilität erhält, anpreßt.

213 **Das Mitreißen von Luft durch Flüssigkeitsstrahlen.** Wenn ein schnell dahinschießender Strahl einer Flüssigkeit oder auch einer Luftart durch Luft geht, so reißt er die ringsum adhärirende Luft mit sich fort; in den verdünnten Raum strömt neue Luft mit bedeutender Geschwindigkeit, kommt dadurch auch wieder mit dem Strahle in Berührung und wird von demselben ebenfalls fortgerissen; in manchen Fällen, besonders wenn der Strahl durch dünne Röhren geht, mögen einzelne Theile des Strahles wie Kolben die Luft vor sich hertreiben und dadurch luftleere Räume hinter sich erzeugen, die von schnell nachströmender Luft erfüllt, von eben so schnell folgenden flüssigen Kölbchen wieder von derselben befreit werden. Auf diese Weise entsteht ein fortwährendes Strömen von Luft rings um den Strahl herum in der Richtung desselben und dadurch rings um den Strahl eine Luftverdünnung, welche wieder ein dauerndes Zuströmen von Luft zur Folge hat. Am deutlichsten läßt sich diese Erscheinung zeigen mit dem Apparat von Buff, Fig. 113. Bläst man durch ab einen Luftstrom, so entsteht bei bc eine Luftverdünnung, welche durch Steigen des Quecksilbers bei f ersichtlich ist. Beiläufig gesagt, wenn man bei d einbläst, so entsteht bei bc eine Luftverdichtung, angezeigt durch Fallen des Quecksilbers bei f.

Fig. 113.

Fig. 114.

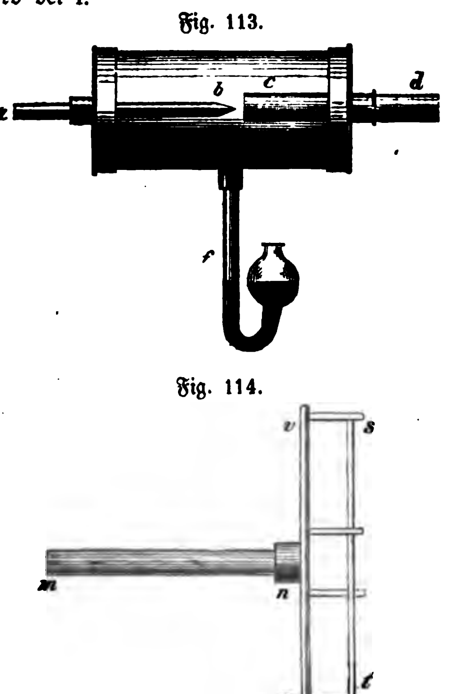
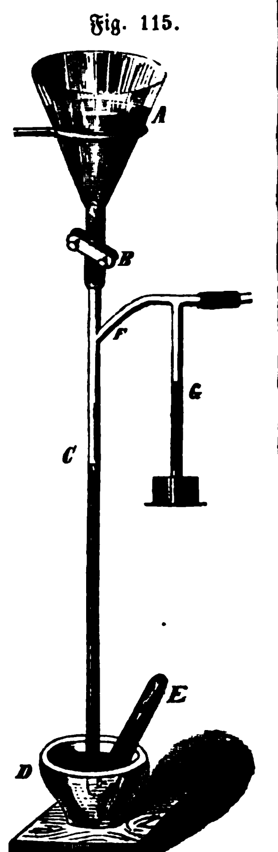


Fig. 115.



Durch die saugende Wirkung eines Strahles erklärt sich die zuerst von Clement und Desormes (1826) beobachtete Erscheinung, daß eine leichte Scheibe einem Luftstrahl entgegen gehen kann. Bläst man mittels des Rohres mn (Fig. 114) durch die Scheibe vz gegen die leichte Papierscheibe st, die locker zwischen einigen Stiften schwebt, so geht dieselbe nach vz hin und klebt beinahe auf dieser Scheibe.

Diese saugende Wirkung von Strahlen ist uns schon begegnet bei der Ausflußmenge eines sich erweiternden Ausflußrohres. Sie hat indeß noch mehrere nützliche Verwendungen gefunden; schon das alte *Wassertrommelgebläse* beruht auf derselben: herabstürzendes Wasser reißt Luft mit in seinen Kanal, welche durch ein seitliches Rohr in das Schmiedefeuer strömt. Durch das *Locomotivenblasrohr* geht ein Dampfstrahl in den Schornstein der Locomotive, reißt dort die Luft fort, so daß neue Luft durch den Herd nachströmen muß, wodurch der Zug erhalten bleibt. Giffards *Injector* oder *Dampfstrahlpumpe* (1860) pumpt durch einen Dampfstrahl Wasser in einen Dampfkessel. Physikalisch am wichtigsten ist Sprengels *Luftsauger* (1865), Fig. 115. Durch den Quetschhahn B läßt man Quecksilber das Rohr C herabfallen; hierdurch wird irgend ein Gas aus einem mit dem Arme F in Verbindung stehenden Körper ausgesaugt und zu näherer Untersuchung in den Cylinder E geleitet. Graham bediente sich dieses Apparates bei seinen Untersuchungen über Absorption und Diffusion. — Magnus erklärte 1853 mit den beiden Erscheinungen des Apparates 113 die seitliche Ablenkung der Geschosse: die Luft um ein Geschoß herum sei ebenfalls in Rotation und stoße auf der einen Seite durch Voranbewegung auf die entgegenkommende Luft, während sie auf der anderen Seite derselben ausweiche; so geschehe auf der ersten Seite eine Luftverdichtung und auf der zweiten eine Verdünnung, folglich müsse das Geschoß allmälig nach dieser Seite abgelenkt werden. — Auf die saugende Wirkung von Luftstrahlen gründete ich 1855 einen Vorschlag zur Lenkung der Luftschiffe. — Eine neue wichtige Anwendung des saugenden Strahles ist das *Schnellfilter* von Bunsen (1868). Der Hauptbestandtheil ist Bunsens *Wasserluftpumpe*, Fig. 116. Diese besteht aus einem weiten Glasgefäße b, in welches das Luftrohr d luftdicht eingeschmolzen und fast bis zum unteren Ende herabgeführt ist, während das Glasgefäß unten in das Wasserrohr c übergeht. Wird nun aus der Wasserleitung l mittels des Quetschhahnes a Wasser in das Gefäß b hineingelassen, und stürzt dasselbe durch das Wasserrohr mehr als 10^m tief hinab, so reißt dieses Wasser die Luft aus dem Luftrohre def und den Gefäßen, die noch mit f in Verbindung stehen und entleert dieselben so vollständig, daß nur noch die Spannung des bei der gerade herrschenden Temperatur möglichen Wasserdampfes von 7—10^{mm} übrig bleibt, wie man aus dem von e ausgehenden offenen Quecksilbermanometer zu erkennen vermag.

Fig. 116.

Die saugende Wirkung der Dampfstrahlen hat in den letzten Jahren so zahlreiche neue Anwendungen erfahren, daß es jetzt Fabriken von Dampfstrahlapparaten gibt; die größte Ausbreitung fand Körtings *Dampfstrahl-Unterwindgebläse*, das alle anderen Gebläse und sogar die hohen Schornsteine zu verdrängen geeignet erscheint, und bei größter Billigkeit die größte Ersparniß an Brennmaterial und vollständigste Verbrennung desselben ohne Rauchabgang ermöglicht. Die innere Einrichtung desselben ist aus Fig. 117, seine Verbindung z. B. mit dem Heizraume eines Röhrenkessels aus Fig. 118 zu ersehen. Durch den Dampfkanal a strömt der Dampf in ein nach

unten sich verengerndes Gefäß b. Die untere Mündung desselben, die sogenannte Dampfdüse, kann durch die Regulirspindel s mehr oder weniger geöffnet werden, indem man mittels des Handrädchens c diese Spindel mehr oder weniger heben kann. Es entsteht hierdurch ein zwischen der Spitze der Spindel und der Dampfdüse freibleibender Ring, durch welchen der Dampfstrahl in das folgende, etwas weitere Gehäuse, schießt und dadurch Luft mit sich fortreißt, die, wie die Pfeile andeuten, durch seitliche Oeffnungen des Gehäuses herbeiströmt. Dabei erhält diese Luft dieselbe Geschwindigkeit, welche der Dampf nach seiner Expansion in dieser Zwischendüse besitzt, und diese Geschwindigkeit der Luft und des Dampfes wird benutzt, um beim Ueberspringen in die zweite Zwischendüse wieder Luft anzusaugen u. s. w., bis endlich im engsten Theile des Druckconus d die Geschwindigkeit des Gemisches von Dampf und Luft nur noch so groß ist, daß sie dem unter dem Roste zu erzeugenden Drucke entspricht. Mit Hilfe der durch das Handrädchen c zu bewegenden Dampfregulirspindel s hat man es ganz in seiner Gewalt, die Luftmenge, welche angesogen und unter den Rost gepreßt werden soll, zu reguliren. — Die Fabrik von Gebrüder Körting in Hannover baut außer den Dampfstrahlgebläsen auch Dampfstrahlinjectoren zum Speisen der Dampfkessel mit vorgewärmtem Wasser, Dampfstrahlleckapparate, um Schiffslecke unschädlich zu machen, Elevatoren für Korn, Syrup, Wasser u. s. w., Exhaustoren, Scrubbers und Regenerirgebläse für Gasfabriken, Dampfstrahlventilatoren für Trockenräume und Waggons, Dampfstrahlkohlensäuregebläse u. s. w. für Zuckerfabriken, Zerstäubungs- und Diffusions-Injectoren für chemische Fabriken und zahlreiche andere Strahlapparate.

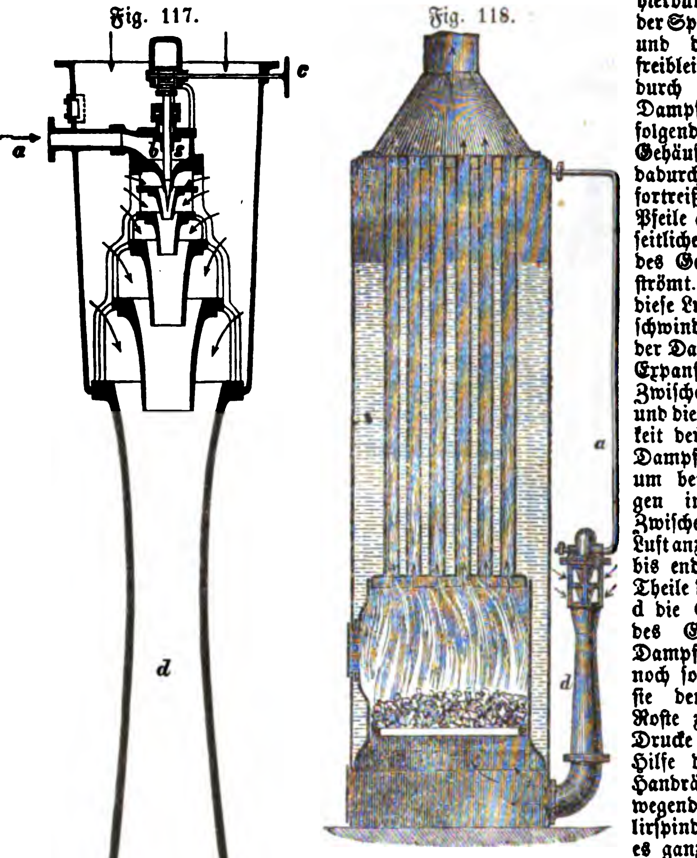


Fig. 117. Fig. 118.

214 Ausfluß der Gase. Ein Gas kann nur dann aus einem Raume in einen anderen fließen, wenn es in dem ersten eine höhere Spannung hat als in dem zweiten, wenn also z. B. ein lufterfüllter Raum mit einem leeren Raume verbunden wird. Die Geschwindigkeit des Ausflusses wird dann durch die bekannte Formel $v = \sqrt{(2gh)}$ berechnet, worin h die Druckhöhe ist, unter welcher das Gas ausströmt, ausgedrückt in der Höhe einer Gassäule von gleicher Dichte, wie das ausströmende Gas sie besitzt. Für Luft, die in den leeren Raum strömt, wird

die Druckhöhe bekanntlich gemessen durch eine Quecksilbersäule von 76 ^{cm} Höhe, also durch eine Luftsäule von 76.10500^{cm} = 7980^{m} Höhe, weil die Luft von gewöhnlicher Dichte bekanntlich 10500 mal leichter als Quecksilber ist. Folglich ist die Geschwindigkeit des Ausflusses $= \sqrt{(2.10.7980)} = 396^{m}$, was an die Clausius'schen Angaben über die Geschwindigkeit der Luftmoleküle erinnert. Diese Geschwindigkeit des Ausströmens von Luft in einen leeren Raum gilt aber nur für den ersten Moment, weil nach diesem sich schon Luft in diesem Raume befindet, die einen immer größeren Gegendruck ausübt, so daß die Geschwindigkeit immer kleiner und endlich bei beiderseits gleichem Drucke gleich Null wird. Kennt man die dem äußeren Drucke entsprechende Luftsäulenhöhe h_1, so kann man die Geschwindigkeit nach der Formel $v = \sqrt{[2g(h-h_1)]}$ berechnen; genauer ist Naviers Formel $v^2 = (2gp_0 : D_0) \log (p_2 - p_1)$, worin D_0 das Gewicht der Cubikeinheit Luft unter dem Drucke p_0 bedeutet, p_2 den inneren und p_1 den äußeren Druck angibt. — Für leichtere Gase als Luft muß in der ersten Formel eine größere Höhe, für schwerere eine kleinere gesetzt werden, und zwar muß diese Höhe der Dichte umgekehrt proportional sein; folglich *verhalten sich die Ausflußgeschwindigkeiten verschiedener Gase umgekehrt wie die Wurzeln aus ihren Dichtigkeiten.* Hieraus folgt als einfache Umkehrung der Satz, daß die Dichten zweier Gase sich umgekehrt wie die Quadrate ihrer Ausflußgeschwindigkeiten verhalten. Auf diesen Satz hat Bunsen 1857 in seinen „Gasometrischen Methoden" eine interessante Methode zur Bestimmung der Dichte von Gasen und Dämpfen gegründet.

Die Ausflußmenge in einer Secunde ist auch hier gleich dem Product des Oeffnungsquerschnittes mit der Geschwindigkeit $= qv$. Doch findet auch hier eine Contraction statt. Für eine dünne Wand ist der Contractionscoëfficient zwischen 0,5 und 0,6; Buff gibt für denselben folgende durch zahlreiche Versuche bewährte Formel $v = 0,626 (1 - 0,789 \sqrt{h})$; auch hier wächst der Coëfficient für dicke Wände, cylindrische und conische Ansatzröhren; erweitern sich dieselben, so wird er sogar größer als 1, gleich 1,12.

Nach Untersuchungen von O. E. Meyer (1866 und 1873) erfahren die Ausflußgesetze auch hier eine Veränderung, wenn der Ausfluß durch capillare Röhren geschieht, und zwar in derselben Weise wie bei den Flüssigkeiten, so daß auch hier Poiseuilles oder besser gesagt Hagens Gesetz gilt: das durch eine Capillarröhre in 1 Min. ausströmende Gasvolumen ist der 4ten Potenz des Halbmessers der Röhre direct und der Länge derselben umgekehrt proportional und steht im geraden Verhältnisse zur *ersten Potenz* des Druckunterschiedes. Meyer gelangte zur Auffindung dieses Gesetzes durch seine Versuche über die Reibung der Gase.

215 **Innere Reibung der Gase** (Maxwell 1860, O. E. Meyer 1865—73). Die Verschiedenheit des Ausflusses von Gasen aus Capillarröhren und des Ausflusses aus einer Oeffnung in einer dünnen Wand ist nur dadurch erklärlich, daß in ersterem Falle die Reibung des Gases an den Wänden der Röhre und der inneren schneller strömenden Schichten an den äußeren langsamer bewegten einen Einfluß ausübt. Nach den Untersuchungen von Meyer haftet nun sowohl bei benetzenden Flüssigkeiten als auch bei Gasen an den Gefäßwänden eine dünne Schicht von Flüssigkeit oder Gas, an welcher sich die folgende bewegte Schicht reibt; es findet daher keine Reibung der Gase an den Wänden, sondern nur eine innere Reibung der Gase statt. Die allgemeinste und einfachste Erscheinung derselben besteht darin, daß zwei bewegte Gasschichten von verschiedener Geschwindigkeit sich in einer ebenen Trennungsfläche berühren; die Reibung äußert sich dann dadurch, daß die schneller bewegte Schicht verzögert, die langsamer bewegte beschleunigt wird, und die Größe der Reibung wird durch den Druck gemessen, der für sich allein jene Verzögerung hervorzubringen im Stande ist. Die Reibung ist offenbar, wie auch schon Newton für Flüssigkeiten angenommen hat, direct proportional der Größe der Berührungsflächen und der Geschwindigkeitsdifferenz der beiden Schichten; außerdem hängt

sie auch von der materiellen Beschaffenheit der Gase ab, ist für verschiedene Gase verschieden groß. Dieser Einfluß der materiellen Beschaffenheit wird durch einen Coëfficient ausgedrückt, den man die Reibungsconstante nennt und mit η bezeichnet; dieselbe ist nach Meyers Forschungen unabhängig von der Dichte des Gases, also auch von dem Drucke, unter welchem dasselbe steht, hängt aber von der Temperatur desselben ab, und zwar ist sie der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur direct proportional; endlich ist sie für verschiedene Gase verschieden. Sie bedeutet die verzögernde Kraft, welche eine Schicht von 1 qcm Oberfläche ausübt, wenn die Geschwindigkeit derselben um 1 cm geringer ist, als die einer um 1 cm entfernten Schicht. Meyer bestimmte dieselbe für die Luft aus Transpirationsversuchen Grahams (1846), aus horizontalen Schwingungen horizontal aufgehängter Platten, wie auch Maxwell (1866) gethan hatte, aus eigenen und Bessel'schen Pendelversuchen und aus zahlreichen Ausflußbeobachtungen und fand sie für Luft = 0,00019, für Sauerstoff = 0,00021, für Wasserstoff, wo sie den kleinsten Werth besitzt, = 0,00009. Diese Zahlen sind deßhalb von besonderem Interesse, weil man mittels derselben die Entfernungen der Gasmoleküle von einander und die Größe derselben ausrechnen kann.

Die verzögernde und die beschleunigende Einwirkung zweier Gasschichten kann man nach der mechanischen Theorie der Gase folgendermaßen erklären. Wenn zwei ruhende Gasschichten von gleicher Dichte einander berühren, so wird vermöge der molekularen fortschreitenden Bewegung der Gasmoleküle, die bekanntlich nach allen Richtungen stattfindet, in einer gewissen Zeit eine ebenso große Zahl von Molekülen aus der ersten in die zweite fliegen, als von der zweiten in die erste; dasselbe muß auch stattfinden, wenn die beiden Schichten in Bewegung sind. Nur werden die Moleküle, welche durch ihre molekulare Bewegung schon theilweise die Richtung der Bewegung beider Schichten besitzen, in der schnelleren Schicht eine größere Geschwindigkeit haben als in der langsameren; da nun die Moleküle der schnelleren in die langsamere, die der langsameren in die schnellere diffundiren, so werden erstere allmälig die langsamere beschleunigen, letztere die schnellere verzögern. Aus dieser Erklärung erhellt auch sofort, warum die Reibung der Größe der Flächen und der Geschwindigkeitsdifferenz proportional ist. Auch die Unabhängigkeit von der Dichte läßt sich ungefähr einsehen; denn bei z. B. 3facher Dichte mögen wohl 3mal so viele Moleküle übergehen, sie haben aber auch dann die dreifache Masse zu beschleunigen. Endlich ist auch die Abhängigkeit von der Temperatur ersichtlich; denn bei höherer Temperatur ist die Geschwindigkeit der Moleküle größer, und zwar wächst dieselbe proportional zu der Quadratwurzel aus der absoluten Temperatur, da diese durch die lebendige Kraft $\frac{1}{2}mv^2$ der Moleküle ausgedrückt wird; also muß auch die Wirkung der Reibung jener Größe proportional sein.

Die schärfere theoretische Ableitung, deren Grundgedanken hier angedeutet sind, führte Meyer zu Formeln, welche das in 214. angegebene Gesetz über den Ausfluß oder die Transpiration von Gasen durch Capillarröhren enthalten, und welche andererseits zu Ausdrücken für die Weglänge der fortschreitenden Gasmoleküle oder für den Abstand der Moleküle von einander leiteten.

5. Molekularwirkungen der Luftarten.

216 **Die Diffusion der Luftarten** (Dalton 1802). Wenn verschiedene Luftarten einander berühren, so bleiben dieselben nicht getrennt wie Oel und Wasser, sondern sie durchdringen sich gegenseitig wie Wasser und Weingeist, so daß in verhältnißmäßig kurzer Zeit ein gleichmäßiges Gemenge der Luftarten entstanden ist. Diese Erscheinung nennt man die Diffusion der Gase. Wir haben schon in 54. aus der neuen Anschauung über das Wesen der Luftarten das Grundgesetz der Diffusion abgeleitet: die Diffusionsgeschwindigkeit, also auch das diffundirte Gasvolumen ist umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte der Gase. Dieses Gesetz wurde von Graham 1834 aus Versuchen gefolgert, bei denen sich die Gase allerdings nicht direct berührten, sondern

durch künstliche Gypsscheiben getrennt waren; für diese Einrichtung kann, wie Bunsen 1858 zeigte, das Gesetz nicht mit Genauigkeit gelten, weil hier die Capillarität des porösen Gypses mitwirkt, eine Erscheinung, die der Endosmose der Gase angehört.

Nach dem angeführten Graham'schen Gesetze hat der Wasserstoff die stärkste Diffusion, 4mal stärker als die des Sauerstoffs und auch ungefähr als die der Luft; deßhalb dringt der Wasserstoff auch durch künstliche Zeughüllen, welche so porös sind, daß sie eine directe Berührung der Gase gestatten, mit großer Raschheit, was der Verwendung des Wasserstoffs zu Luftballonen sehr hinderlich ist. — Vermöge der Diffusion der Luftarten hat unsere Atmosphäre überall, in der Tiefe wie in der Höhe, in den gefülltesten Sälen wie in den zugigsten Räumen denselben Procentgehalt von Sauerstoff, vermöge dieser Eigenschaft geht das Kohlendioxyd an die Pflanzen und der durch diese befreite Sauerstoff von denselben weg in die Luft, wodurch die Luft immer von Kohlendioxyd gereinigt und lebensvoll erhalten wird. Doch sinkt dies schwere Kohlendioxyd leicht an die tiefsten Stellen und diffundirt von dort weniger rasch in die Luft hinaus, daher findet es sich häufig in tiefen Brunnen, Gruben u. s. w. — Grahams Gesetz kann auch als eine Folgerung des in 215. gefundenen Ausflußgesetzes verschiedener Gase aufgefaßt werden.

Die Lufthaut und die Hauchbilder (Moser 1829). Jedes Kind entdeckt die Erscheinung der Hauchbilder; man schreibt mit dem Finger auf eine trockene Fensterscheibe, ohne die Züge wahrzunehmen; haucht man sodann auf die Scheibe, so treten die Züge deutlich hervor, und zwar dadurch, daß die unbeschriebenen Stellen durch den Hauch trüber werden als die beschriebenen. Hat man die Scheibe vorher kräftig abgewischt, so tritt die Erscheinung viel schwächer oder gar nicht auf. Aehnliche Erscheinungen zeigen sich, wenn man auf eine frisch polirte Metallplatte einen Stempel mit eingegrabenen oder hervorragenden Zügen, eine Münze oder dgl. legt und nach Wegnahme des Stempels die Platte behaucht oder Quecksilberdämpfen aussetzt. Ja sogar die Züge von Bildern, die lange dicht hinter einer Glastafel lagen, treten später auf der Glastafel hervor. 217

Moser, der diese Erscheinung zuerst näher untersuchte, erklärte sie irrthümlicher Weise für Folgen eines in allen Körpern vorhandenen latenten Lichtes. Die richtige Erklärung nebst zahlreichen Versuchen zu derselben gab Waidele 1843. Sie beruht auf der Lufthaut, d. i. einer dünnen Schicht von stark verdichteter Luft, von Dämpfen und unendlich feinen Stäubchen, die sich auf jedem Körper bildet, weil die Luftmoleküle vermöge ihrer molekularen Bewegung ganz in die Nähe der Körper gelangen und dort durch die Anziehung derselben festgehalten werden. Diese Haut ist es, die bei der Anfertigung eines Barometers durch sorgfältiges Auskochen mit Quecksilber von der Innenwand der Röhre entfernt werden muß. Wischt man diese Haut durch Schreiben auf eine Glasplatte weg, so condensiren sich nachher an diesen Stellen mehr Dämpfe, weil diese Stellen mehr Dampf als die übrigen annehmen können; die beschriebenen Stellen sind daher mit einer durchsichtigen Wasserhaut, die anderen mit einzelnen Dunstbläschen bedeckt, wodurch die ersteren weniger trüb als die letzteren erscheinen. Wird eine polirte Metallplatte mit frisch ausgeglühtem Trippel abgerieben, so nimmt dieser die Lufthaut weg; setzt man dann einen Stempel auf die Platte, so theilt sich dessen Lufthaut der Platte durch die Diffusion mit, aber nur an den Berührungsstellen; daher entsteht nachher durch Behauchen ein Bild der Stempelzüge. Ebenso entsteht ein Bild, wenn die Platte nicht geputzt, der Stempel aber abgerieben ist. Sind dagegen beide abgerieben oder beide künstlich mit gleichen Lufthäuten versehen, so entsteht kein Bild. Wenn aber beide längere Zeit gelegen haben und nicht abgerieben werden, so haben sie eine verschiedene Lufthaut; es wird daher auch bei der Berührung die Diffusion gegen einander verschieden sein, es muß ein theilweiser Austausch der Lufthäute an den Berührungsstellen stattfinden, wodurch in diesem Falle schwache Bilder entstehen können. — Besonders merkwürdig sind die elektrischen Hauchbilder (Rieß 1838, Karsten 1842), welche sich an den Stellen bilden, über die ein elektrischer Funke geschlagen ist, oder durch welche Elektricität zur Erde abgeleitet wurde; solche Stellen geben nach Jahren noch Hauchbilder.

Die Absorption der Luftarten. Nicht blos auf der Oberfläche der Körper befindet sich Luft, sondern die Luftatome dringen auch durch die Poren und die molekularen Zwischenräume in das Innere der Körper ein und haften dort durch die Attraction fest. Diese Erscheinung nennt man die Einsaugung, Verschluckung oder Absorption der Gase. Man kann dieselbe einfach und auffallend zeigen, wenn 218

man in einem umgestülpten Glascylinder über Quecksilber Kohlendioxyd auffängt und dann ein Stück frisch ausgeglühter Kohle in den Raum bringt; das Quecksilber steigt dann rasch in die Höhe. Noch rascher geschieht das Steigen, wenn man Ammoniakgas durch Wasser verschlucken läßt. — Die Gewichtsmenge des absorbirten Gases ist nach Henry (1803) dem Drucke proportional, unter welchem das Gas steht. Dann wächst dieselbe, wenn die Temperatur niedriger wird; doch steht sie zu der Temperatur in einem verwickelten Verhältnisse. So gibt z. B. Bunsen (1857) für den Absorptionscoëfficienten des Ammoniaks in Wasser, d. i. für das Gasvolumen, welches von der Volumen-Einheit der Flüssigkeit bei 760mm Luftdruck verschluckt wird, folgende Formel: $1049{,}63 - 29{,}496\, t + 0{,}6769\, t^2$, worin t die Temperatur bedeutet, woraus folgt, daß bei 0° das Wasser 1049, bei 20° aber nur 731 Volumina Ammoniak verschluckt. Umgekehrt wird durch Verminderung des Druckes die Absorption geringer, worauf das Schäumen von Flüssigkeiten beruht; ebenso durch Erhöhung der Temperatur, weßhalb durch Ausglühen Körper ihre Gase verlieren. — Die Menge des absorbirten Gases hängt auch wesentlich von der Natur des Gases und des absorbirenden Körpers ab. Im Allgemeinen werden Gase um so leichter absorbirt, je leichter coërcibel sie sind; so verschluckt Buchsbaumkohle unter denselben Umständen 90 Volumina Ammoniak, unter denen sie kaum 2 Volumina Wasserstoff aufnimmt; so absorbirt Wasser 1000 Volumina Ammoniak, während es nur 0,02 Volumina Wasserstoff verschluckt. Ueber den Einfluß des absorbirenden Körpers ist noch wenig erforscht; im Allgemeinen scheint die Absorption um so größer zu sein, je geringer die Dichte und je poröser der Körper ist.

So absorbirt Weingeist von allen Gasen ein größeres Volumen als Wasser. Kohle und Platinschwamm verdanken ihrer Darstellungsweise eine große Porosität; sie absorbiren daher sehr stark. Da nun mit der Absorption eine Verdichtung der Gase, also ein Verlust von Arbeit verbunden ist, so muß bei der Absorption Wärme entstehen; darauf beruht die Anwendung von Platinschwamm im Döbereiner'schen Feuerzeug und die Selbstentzündung manches Haufens poröser Pulverkohle. — Aus der leichteren Absorption coërcibler Gase scheint zu folgen, daß die Gase bei der Absorption flüssig oder gar fest werden. Am deutlichsten zeigen dies die zerfließlichen Salze, wie Chlorcalcium, Soda u. s. w., welche in dem absorbirten und condensirten Wasserdampf zerfließen, sodann die hygroskopischen Stoffe, wie Haare, Fischbein, Pflanzenfasern, welche durch den absorbirten und condensirten Wasserdampf feucht und schlaff werden. Außerdem werden Ammoniak und Salzsäure, die schon bei geringerer Compression flüssig werden, durch die Absorption auf einen vieltausendfach kleineren Raum gebracht, wodurch sie ebenfalls flüssig werden müssen.

Wenn nun auch die Absorption von Luftarten durch Flüssigkeiten nahezu denselben Gesetzen folgt, wie diejenige durch poröse feste Körper, so sind dies doch zwei ganz verschiedene Vorgänge; denn die letztere Absorption ist nur ein Eindringen der Luftmoleküle durch Diffusion und das Festhalten derselben durch die Anziehung, während die erstere eine Lagerung der Luftmoleküle in den molekularen Zwischenräumen, eine Art von Auflösung ist. Indessen findet sich auch bei den festen Körpern eine dieser ähnliche Absorption, nämlich die Absorption von Gasen durch Kolloide und durch gluthweiche Metalle, welche in neuerer Zeit von Graham (1867 und 1868) näher untersucht worden ist. Dieser Forscher fand, daß Kautschuk 0,6 seines Volumens Wasserstoff und sein ganzes Volumen Kohlendioxyd aufnimmt; da dieses stattfindet, ohne daß das Volumen des Kautschuk um eine Spur zunimmt, so liegt hier ebenfalls die Vermuthung nahe, daß die Gase durch Absorption flüssig werden. Diese Absorption wird in der Wärme, wodurch der Kautschuk sich mehr dem flüssigen Zustande nähert, größer, woraus sich die Aehnlichkeit dieser Absorption mit der Lösung ergibt. Noch auffallender tritt dies, bei den kolloiden Metallen hervor. Bei Grahams Versuchen nahm Platin sein 4faches Volumen Wasserstoff auf, Silber 1—4 Vol. Sauerstoff, Eisen ½ Volumen Kohlenoxyd, Palladium sogar über 900 Volumina Wasserstoff. Dies geschah aber nur, wenn den Metallen in glühendem Zustande diese Gase geboten, und wenn sie dann langsam abgekühlt wurden; beim Erhitzen entwichen die Gase wieder. Hierin liegt wieder eine Uebereinstimmung mit der Lösung. Da der Wasserstoff in dem Palladium ein vieltausendmal kleineres Volumen als gewöhnlich hatte, so konnte er unmöglich noch gasförmig, er mußte flüssig sein; dies wird auch noch da-

durch bestätigt, daß er in höherer Temperatur wie jede Flüssigkeit rascher verdampfte. Da er endlich nach der Abkühlung selbst im Vacuum nicht entwich, so liegt die Vermuthung sehr nahe, daß er bei niederer Temperatur sogar fest war. So wäre denn Graham das Problem der Condensation des Wasserstoffs, wenigstens einstweilen in einem anderen Körper, gelungen; der flüssige und feste Wasserstoff bildet hier Legirungen mit dem Palladium, was dem sonstigen metallischen Verhalten des Wasserstoffs ganz gemäß ist. Noch besser gelang Graham diese Legirung, als er die elektrische Anziehung statt der Wärme benutzte. Er brachte (1860) ein Stück Palladium an den negativen Pol eines Wasserzersetzungsapparates; dann wurde durch die elektrische Anziehung des negativen Palladiums zu dem an sich positiven Wasserstoff die Absorption bedeutend verstärkt, so daß das Palladium sein 800—1000 faches Volumen Wasserstoff zu absorbiren vermochte. Graham nannte diesen Wasserstoff, der im Palladium fest vorhanden ist, und der in ähnlicher Weise auch in vielen Palladiumlegirungen und nach Böttcher (1874) auch in Nickel, Kobalt und Zinn fest erhalten werden kann, Hydrogenium, und bestimmte das spec. Gew. desselben = 0,8, wodurch abermals der feste Zustand angedeutet wird. Graham hält das Hydrogenium für activen Wasserstoff = HHH, wie Ozon activer Sauerstoff ist; die active Eigenschaft zeigt derselbe in seiner stark reducirenden Wirkung; so reducirt er Ferricyankalium, Kaliumnitrat, Ferrisulfat, was der gewöhnliche Wasserstoff nicht thut. Graham beobachtete schon, daß Palladiumdraht beim Hydrogeniren sich stark verlängert und sich, wenn das Hydrogenium durch starkes Erhitzen oder Sprengels Luftsauger entfernt wird, unter seine frühere Länge verkürzt. Böttcher beobachtete, daß Blech beim Hydrogeniren sich spiralig krümmt. Das Palladiumblech wird nach Böttcher viel stärker hydrogenirt, wenn es vorher mit fein vertheiltem Palladium, mit Palladiumschwarz überzogen wird; ein solches hydrogenirtes Blech entwickelt, wenn es aus der Zersetzungszelle kommt, Gluthhitze, explodirt, wenn es mit Schießwolle umwickelt ist und brennt längere Zeit fort; wird es in Aether getaucht, so steigt der Wasserstoff stürmisch auf. Jedoch geht nicht aller Wasserstoff aus dem schwarzen Blech heraus; während ein blankes Blech, wie Böttcher aus einer der Palladium-Hydrogenium-Münzen ersah, die Graham seinen Freunden geschenkt hatte, in wenigen Jahren allen Wasserstoff verliert, fand derselbe ein schwarzes Blech, das den überschüssigen Wasserstoff durch Eintauchen in Aether abgegeben hatte, wenigstens nach 30 Tagen noch stark hydrogenirt.

Die Endosmose der Luftarten. Die Luftarten gehen durch dünne Scheidewände wie die Flüssigkeiten; sie zeigen also auch die Erscheinung der Endosmose. Diese Erscheinung ist verschieden nach der Beschaffenheit der Scheidewände. Die Scheidewände können so große Poren haben, daß dieselben mit einander dünne Röhren bilden, durch welche die Gase direct ausströmen können; dann geht die Vermischung der Gase durch Diffusion vor sich; solche Scheidewände sind z. B. Platten von künstlichem Graphit, künstliche Gypsplatten u. dgl. — Viel kleiner schon sind die Poren in thierischen und Pflanzenstoffen, in den meisten Mineralien; denn die Elementargebilde der Natur, die Zellen, Gefäße und Krystallkeime sind meist noch viel kleiner als die feinsten künstlichen Pulverkörner; folglich können durch Scheidewände natürlicher fester Stoffe die Gase nur mit Hilfe eines äußeren Druckes oder der capillaren Anziehung der Porenwände gehen. Am kleinsten sind die Poren der Kolloide und der Kolloidmetalle; ihre Poren sind nur die molekularen Zwischenräume; durch solche Scheidewände können Gase nur dringen, wenn sie sich in den Scheidewänden, wie in 218. gefunden wurde, auflösen und auf der anderen Seite verdunsten. 219

Da die Osmose durch künstliche Scheidewände nur eine Diffusion ist, so müßte sie eigentlich nach Grahams Gesetz, also umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Dichte geschehen, Wasserstoff müßte 4 mal schneller als Sauerstoff und 5 mal schneller als Kohlendioxyd durchgehen. Nach den eingehenden Untersuchungen von Bunsen (1857) gilt aber dieses Gesetz nicht genau, weil die Porenwände einen capillaren Einfluß auf die Gase ausüben, der auch durch den von Meyer entdeckten veränderten Ausfluß der Gase durch Capillarröhren angezeigt wird, sondern nur mit einer entfernten Annäherung, so daß die leichten Gase doch immer schneller durchgehen als die schwereren. Diese Eigenschaft springt durch Versuche mit dem Apparat Fig. 119 deutlich in die Augen; derselbe besteht aus einer auf eine lange Trichterröhre gekitteten porösen Thonzelle, über welche eine Glasglocke mit einem Gaszuleitungsrohr gestülpt wird, während die Röhre in ein mit gefärbter Flüssigkeit gefülltes Glasgefäß tief herabgeht, aus dem sich ein Spritzrohr erhebt. Läßt man Wasserstoffgas in die Glocke strömen, so diffundirt dasselbe in größerer Menge durch

die Thonzelle in die Trichterröhre, als die Luft heraus diffundirt; die Gasmenge und deren Spannung über dem Wasser steigen demnach und treiben einen Wasserstrahl aus dem Gefäße. Läßt man jedoch Kohlendioxyd einströmen, so dringt dieses in geringerer Menge ein, als die Luft herausdringt, die Gasmenge und deren Spannung über dem Wasser mindern sich, und die Flüssigkeit steigt in der Trichterröhre rasch in die Höhe. Der Apparat zeigt entprechend der Diosmose der Flüssigkeiten, daß auch bei den Gasen die Osmose von beiden Seiten her stattfindet. Auf der raschen Exosmose des Wasserstoffs beruht die Gefährlichkeit der Wasserstoffballone; eine interessante Anwendung ist Ansells Wetter-Indicator (1868), Fig. 120. Durch die poröse Thonplatte des Gefäßes dringt das leichte Grubengas der schlagenden Wetter rasch ein und hebt daher das Quecksilber in dem anderen Schenkel des Apparates; durch die dadurch beförderte Berührung des Quecksilbers mit der Schraubenspitze wird ein elektrischer Strom geschlossen, der eine telegraphische Schelle in Bewegung setzt.

Fig. 119.

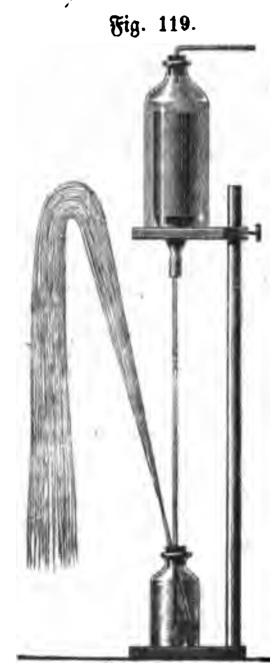


Fig. 120.

Auch kolloide Scheidewände werden am leichtesten und schnellsten von den leichtesten Gasen durchdrungen, weil das Gas an die Scheidewand heran und von dieser wegdiffundiren muß; so dringt durch glühendes Palladium und Platin am meisten Wasserstoff. Indessen gilt diese Regel keineswegs allgemein, weil eben das Durchdringen der kolloiden Wände nur ein Verdunsten des eingedrungenen und gelösten Gases ist, und weil die Lösung in noch unbekannter Weise auf einer Art von chemischer Anziehung beruht. So geht z. B. durch Kautschuk mehr Kohlendioxyd als Wasserstoff, aber doch nur 2mal soviel, während Kautschuk 20 mal soviel Kohlendioxyd als Wasserstoff absorbirt, was sich dadurch erklärt, daß der Wasserstoff beiderseits 5mal schneller diffundirt als Kohlendioxyd; so geht durch Kautschuk mehr Sauerstoff als Stickstoff, trotzdem der Sauerstoff schwerer als Stickstoff ist, welche Eigenschaft benutzt werden kann, durch öftere Kautschuk-Endosmose aus der atmosphärischen Luft eine sauerstoffreichere, wenn auch nicht ganz stickstofffreie Luft zu erzeugen. — Eisen läßt viel mehr Kohlenoxyd als Wasserstoff durch, obwohl das erstere Gas schwerer ist als das letztere; vielleicht wirkt hier die Verwandtschaft des Eisens zum Kohlenstoff mit, und wahrscheinlich beruht die Stahlbereitung auf der Durchdringung des Eisens mit Kohlenoxyd, welches durch Abgabe von Kohlenstoff an das Eisen zu Kohlendioxyd wird, das dann entweicht. Daß Palladium, Platin u. s. w. nur in glühendem Zustande durchdringlich sind, beruht wohl nicht allein darauf, daß die Diffusion der Flüssigkeiten in der Hitze größer wird und daß die Verdunstung mit der Hitze zunimmt, sondern wohl hauptsächlich auf dem Festwerden der absorbirten flüssigen Gase bei niederer Temperatur.

Aufg. 342. Wie groß ist in einer vollkommenen Luftpumpe die Dichte der Luft nach 10 Zügen, wenn die Volumina des Stiefels und des Recipienten bezüglich 2 und 3^{cdm} sind? Aufl.: $^1/_{165}$ oder $4{,}6^{mm}$. — A. 343. Wie viel Züge sind nöthig, um mit dieser Pumpe die Verdünnung auf 1^{mm} zu bringen? Aufl.: 13. — A. 344. Wie groß ist der Stiefel, wenn durch 2 Züge die Luft in einem 4^{cdm} großen Recipienten auf $^1/_3$ der Dichte gelangt? Aufl.: $2{,}9^{cdm}$. — A. 345. Welchen Inhalt hat das Verbindungsrohr, wenn der Stiefel und der Recipient bez. 1 und 2^{cdm} groß sind und die Verdünnung nach 4 Zügen $^1/_6$ beträgt? Aufl.: $0{,}5^{cdm}$. — A. 346. Wenn diese Pumpe zu Compression verwendet wird, wie groß ist die Verdichtung nach 4 Zügen? Aufl.: 3. — A. 347. Mit welcher Geschwindigkeit strömt Wasserstoff in einen luftleeren Raum? Aufl.: 1470^{m}. — A. 348. Welche Geschwindigkeit besitzt Luft von 3 Atm. Spannung, wenn sie in die Atm. strömt? Aufl.: 565^{m}. — A. 349. Welche Luftmenge strömt in 1 Min. durch 1^{qcm} aus? Aufl.: 203^{cbm}. — A. 350. Welche Geschwindigkeit muß ein Körper besitzen, damit er einen für kurze Zeit luftleeren Raum hinter sich zurücklasse? Aufl.: 400^{m}.

Zweiter Theil der Physik.

Die Lehre von der Molekular-Bewegung oder die engere Physik.

Vierte Abtheilung.

Die Molekular-Bewegung im Allgemeinen oder die Wellenbewegung.

221 **Die Wasserwellen** (Gebrüder Weber 1826). Unter Wellenbewegung versteht man jede hin- und hergehende oder Schwingungsbewegung der Moleküle oder Theilchen eines Körpers. Die Moleküle können zwar noch andere, als Schwingungsbewegungen vollbringen, wie z. B. rotirende Bewegungen um ihre Achsen, fortschreitende Bewegungen u. A. Indessen sind die Schwingungsbewegungen weitaus überwiegend zu nennen. Der Ausdruck Wellenbewegung ist von der bekannten Erscheinung auf Flüssen, Seen und Meeren hergenommen, daß die Oberfläche dieser Gewässer sich in krummlinigen Formen auf- und niederbiegt, wenn auf dieselben eine Kraft stoßend oder drückend einwirkt. Die Erhebung über das Niveau wird Wellenberg, die Vertiefung unter dasselbe Wellenthal genannt; Wellenberg und Wellenthal neben einander bilden eine ganze Welle. Die Höhe des Berggipfels über dem Niveau und die Tiefe der Thalsohle unter demselben geben zusammen die Höhe der ganzen Welle; die Entfernung des Anfanges des Wellenberges, wo derselbe aus dem Niveau heraustritt, bis zu dem Ende des Wellenthales, wo dasselbe wieder in das Niveau eintritt, nennt man die Wellenlänge.

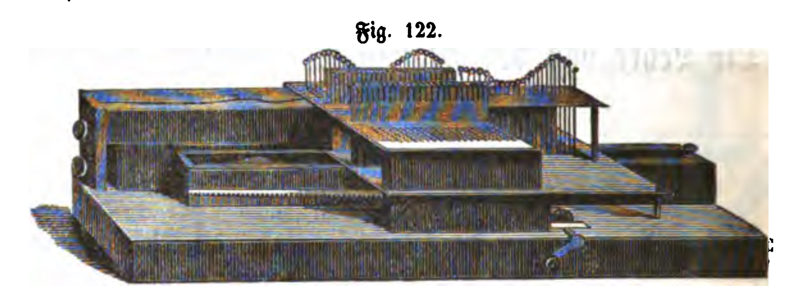
Die Wellenbewegung des Wassers besteht aus einer auf- und abgehenden Schwingungsbewegung der Wassertheilchen. Weil in der Wellenbewegung ein Berg an einer Stelle verschwindet und gleich daneben an der Stelle eines Thales wieder auftaucht, so erscheint einer oberflächlichen Betrachtung die Wellenbewegung als ein Fortrücken der ganzen Wassermasse des Berges an die Stelle des Thales, also demnach als eine wagrechte Bewegung der Wassertheilchen. Dies ist aber nur ein Schein, wie schon ein Stückchen Holz auf wellenbewegtem Wasser lehrt; dasselbe geht nicht mit dem Berge an die neue Stelle desselben wagrecht fort, sondern schaukelt hauptsächlich auf und nieder von Berg zu Thal, von Thal zu Berg. Es läßt sich aber auch leicht zeigen, daß eine solche auf- und abgehende Bewegung der Wassertheilchen die Wellenform erzeugt.

Es seien 1, 2, ... 8 (Fig. 121) 8 gleich weit von einander entfernte Theilchen einer Wasserfläche, welche eine identische auf- und abgehende Schwingungsbewegung von elliptischer (grad- oder kreisliniger) Bahnform vollbringen mögen, und zwar der Art, daß die Theilchen nicht gleichzeitig ihre Bewegung beginnen, sondern in gleichen Zwischenzeiten nach einander. Dann

Fig. 121.

müssen, wenn das Theilchen 1 wieder in seine ursprüngliche Lage gelangt ist, also eine ganze Schwingung vollendet hat, die folgenden Theilchen bezüglich $^7/_8$, $^6/_8$ .... ihren Bahn durchlaufen haben, sich also zu derselben Zeit in 2', 3' .... u. s. w. befinden, während das Theilchen 9 noch ganz in Ruhe ist; die Zwischentheilchen werden Zwischenlagen einnehmen. Verbindet man die neuen Lagen der Theilchen durch eine zusammenhängende Curve, so springt die Wellenform derselben sofort in die Augen. — Auch mittels Eisenlohrs Wellen-Apparat oder mit Fessels Wellenmaschine (Fig. 122) läßt sich zeigen, daß eine Reihe nach einander schwingender Theilchen eine Wellenform bildet.

Fig. 122.



Hiermit ist indeß nur gezeigt, daß durch die Schwingungsbewegung die Wellenform entstehen kann, nicht aber, daß die Wasserwellen wirklich aus schwingenden Theilchen bestehen. Die Gebrüder Weber haben (1825) dies nachgewiesen, indem sie in einer aus Glastafeln gebildeten Wellenrinne dem Wasser Bernsteinkörnchen beimengten und die Bewegungen derselben beobachteten. Sie fanden, daß die Bewegungen der oberen Theilchen aus elliptischen Schwingungen bestehen, daß die senkrechte Achse dieser Ellipsen nach der Tiefe zu immer kleiner wird, und daß endlich etwa in der hundertfachen Tiefe der Wellenhöhe die Wassertheilchen nur wagrecht hin- und hergehen.

Außerdem geht aber auch aus der Entstehung der Wellenbewegung hervor, daß die Wassertheilchen eine auf- und abgehende Bewegung hierbei vollziehen müssen. Wellen entstehen nämlich durch einen Druck oder Stoß auf die Oberfläche des Wassers, wie ihn der Wind oder ein fallender Körper ausübt; nachahmen läßt sich diese Erzeugung von Wellen am reinsten, wenn man aus einer Flüssigkeit mittels einer Röhre eine Säule auffaugt und dieselbe dann wieder sinken läßt. Das Wasser erfährt in solchen Fällen an einer Stelle einen größeren Druck als vorher; dieser pflanzt sich nach allen ringsum liegenden Stellen in gleicher Weise fort und zwar in der Richtung von unten nach oben, wodurch das Wasser ringsum steigen muß, ebenso wie in communicirenden Röhren das Wasser in dem einen Schenkel sofort steigt, wenn auf das Wasser im anderen Schenkel ein größerer Druck ausgeübt wird. Im ersten Moment der Wellenbewegung sind also die Theilchen der gedrückten Stelle im Niedergehen und bilden ein Wellenthal, die Theilchen rings um dieses Thal dagegen sind im Aufsteigen und bilden einen ringförmigen Wellenberg. Dieser Berg aber wird durch seine Schwere niedergezogen; die aufwärts gerichtete Geschwindigkeit wird daher immer kleiner, wird endlich gleich Null und weicht einer durch die Schwere erzeugten abwärts gehenden Bewegung. Im Niveau angekommen, können die Theilchen nicht plötzlich zur Ruhe gelangen; sie müssen vielmehr nach dem Gesetze der Trägheit unter das Niveau herabgehen, wodurch im zweiten Moment an der Stelle des Ringberges ein Ringthal entsteht, während rings um dasselbe durch den hydrostatischen Druck der herabgehenden Theilchen dieses Thales sich ein Wellenberg bildet. Dieser zweite Ringberg sinkt im dritten Moment und wird zu einem Thale, erzeugt aber ebenso in demselben Augenblicke rings herum einen dritten Wellenberg. In solcher Weise pflanzt sich die ursprüngliche Arbeit in immer weiteren ringförmigen Thälern und Bergen von dem Anfangspunkte nach außen fort; die Tiefen und Höhen derselben müssen immer kleiner werden, da dieselbe Arbeit sich auf eine immer größere Masse verbreitet; endlich werden die Höhen verschwindend klein und die Wellenbewegung ist zu Ende. Diese Erklärung zeigt nicht nur die auf- und abgehende Bewegung der Theilchen, sondern läßt auch erkennen, daß durch den seitlichen Druck der Wassertheilchen, wie durch die schiefen Ebenen der Berge eine seitliche Bewegung entsteht, die sich mit der ersteren zu einer krummlinigen Bewegung combinirt. Diese besteht nun dann aus geschlossenen Curven, wenn an einer und derselben Stelle die Wellen sich in gleichen Dimensionen öfter wiederholen; werden aber die Wellen immer kleiner, so ist die Curve eine elliptische Spirale.

Eigenschaften und Dimensionen der Wasserwellen. 1. Die Wellenlänge ist gleich dem Wege, um welchen sich die Schwingungsbewegung fortpflanzt, während ein Theilchen eine Schwingung vollzieht. Denn jedes folgende Theilchen einer Welle beginnt seine Schwingung später als das vorhergehende; dadurch hat jedes Theilchen eine andere Lage und dadurch hat die Welle an jeder anderen Stelle eine andere Richtung. Die Richtung und Form des Anfanges der Welle wiederholt sich erst da, wo ein Theilchen genau dieselbe Bewegung zu derselben Zeit vollbringt wie das erste Theilchen; also beginnt eine neue Welle an dem Punkte, bis zu welchem die Bewegung fortgeschritten ist, wenn das erste Theilchen seine Schwingung vollendet hat. Hieraus ergeben sich noch folgende zwei Sätze: 222

2. Theilchen, die um eine oder mehrere ganze Wellenlängen oder, was dasselbe ist, um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, stimmen in ihrer Schwingungsbewegung ganz überein, haben dieselbe Richtung, dieselbe Geschwindigkeit und denselben Abstand von der Ruhelage; sie befinden sich in gleichen Schwingungsphasen. 3. Theilchen, die um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind (wie z. B. 1 und 5, 2 und 6 in Fig. 121), befinden sich in entgegengesetzten Schwingungsphasen.

Eine Wellenbewegung, wie wir sie bisher betrachtet haben, in welcher also die schwingenden Theilchen nach und nach in Bewegung versetzt werden, wird eine fortschreitende Wellenbewegung genannt. Wenn dagegen alle Theilchen gleichzeitig ihre Bewegung beginnen und vollenden, so nennt man diese Bewegung eine stehende Wellenbewegung. In beiden Erscheinungen können die Schwingungen transversal oder longitudinal sein, d. h. auf der Richtung der Fortpflanzung der Bewegung senkrecht stehen oder mit dieser Richtung parallel sein; die Richtung der Fortpflanzung ist gewöhnlich auch eine Hauptrichtung des schwingenden Körpers, z. B. eine Richtung der Oberfläche des Wassers. — Außer der Wellenlänge und der Wellenhöhe, welche gleich der Entfernung der höchsten Lage eines Theilchens von seiner tiefsten, gleich der Schwingungsweite oder Oscillations-Amplitude ist, gehört noch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, d. i. der Weg, um welchen sich die Bewegung in einer Secunde fortpflanzt, zu den Hauptdimensionen der Wellenbewegung; dieselbe ist nicht zu verwechseln mit der Oscillationsgeschwindigkeit, d. i. mit der Geschwindigkeit der einzelnen schwingenden Theilchen; statt dieser kann man auch die Schwingungszeit oder Schwingungsdauer betrachten, d. i. die Zeit für einen Umlauf eines Theilchens; denn dieselbe steht bei gleichen Schwingungen in umgekehrtem Verhältnisse zu der Schwingungsgeschwindigkeit.

Ueber den Zusammenhang dieser Dimensionen bei den Wasserwellen ergibt sich Folgendes: Je stärker der wellenerzeugende Stoß ist, desto schneller werden die getroffenen Theilchen sich bewegen, desto größere Bewegungen werden dieselben also vollbringen, und desto weiter wird sich während der Schwingungszeit die Bewegung fortpflanzen. Die Wellenhöhe sowohl, wie die Wellenlänge müssen demnach mit der Stärke des Stoßes wachsen. Die Schwingungszeit aber wird kleiner werden, oder wenigstens in geringerem Grade zunehmen, weil sich zu der größeren Stoßgeschwindigkeit noch die durch den höheren Fall erzeugte größere Fallgeschwindigkeit summirt. Da sich also in kleinerer Zeit die Bewegung um eine größere Strecke fortpflanzt, so muß mit der Stärke des Stoßes auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zunehmen. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wasserwellen ist demnach von der Höhe und der Länge der Wellen abhängig; hohe Wellen laufen schneller als niedrige; wirft man in die äußersten Kreise eines Wasserwellensystems einen Stein, so schreiten die neuen Kreise rascher fort als die vorigen. Einen kaum merklichen Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit hat die Natur der Flüssigkeit; denn ebenso vielmal, als sich durch das größere Gewicht einer dichteren Flüssigkeit die fortpflanzende Kraft vergrößert, ebenso vielmal vergrößert sich auch die zu bewegende Masse. Größer dagegen ist der Einfluß der Tiefe der Flüssigkeit; in tiefem Wasser ist die Geschwindigkeit der Wellen

größer als in flachem, ohne indessen der Tiefe direct proportional zu sein; die Ursache dieser Verzögerung liegt in der Reibung und in der Adhäsion des Wassers gegen den Boden, welche deßhalb einen Einfluß auszuüben vermag, weil sich die Bewegung der Wassertheilchen bis in die 350fache Tiefe der Wellenhöhe fortpflanzen kann. Wegen der Verzögerung der Wellen an Untiefen und nach den Ufern zu werden die vorausgehenden von den folgenden eingeholt und dadurch erhöht; auch vereinigen sich zurückgeworfene Wellen mit den ankommenden. So entstehen sehr hohe Wellen, deren Schlag man die Brandung nennt. Während auf offenem Meere wie in der Ostsee, die Wellenberge nur 2—3^m Höhe haben und im Weltmeere höchstens 10^m Höhe erreichen, gehen sie an Küsten bis auf 20^m, ja der 40^m hohe Leuchtthurm auf dem Eddystone wird bei besonders stürmischem Wetter durch Wellen um seine eigene Höhe überstiegen. Geht der Wind über eine gewisse Stärke hinaus, so verhindert sein Druck das Aufsteigen der Berge, die Wellen werden daher niedriger, steigen aber bei dem Nachlassen des Druckes um so höher auf, welche Erscheinung die Seefahrer hohle See nennen. — Die Geschwindigkeit der Meereswellen beträgt 10 bis 30^m; daher kommen Meereswogen oft eher am Ufer an als der Wind, der sie erzeugte, ja ohne von dem Winde gefolgt zu werden.

Außer der gewöhnlichen, oscillirenden Wellenbewegung des Wassers, deren Gegenbild uns am deutlichsten in einem wogenden Aehrenfelde entgegentritt, gibt es noch mehrere Arten von Wellenbewegungen: 1. Die Kräuselung, eine meist rasch vorübergehende, leichte Ein- und Ausbiegung der glatten Wasserfläche, oft mit kammförmigen Bergen, die ihr Gegenbild in den kammförmigen Wellen des Flugsandes finden; sie entsteht vorzüglich bei wagrechten, auf dem Wasser sich reibenden, leichten Winden und tritt auch auf Wellenbergen ein. Dadurch gibt sie dem Winde einen Anhalt zur Vergrößerung der Berge. Durch eine Oelschicht wird sie beseitigt, worauf der besänftigende Einfluß des Oeles auf die Meereswellen beruht. 2. Die Transmissionswelle, die sich in Kanälen, wo man sie durch Zugießen oder Wegnehmen von Wasser erzeugen kann, fast ungeschwächt Meilen weit fortpflanzt; den holländischen Trekschuiten geht sie voraus und zeigt deren Ankunft an. Sie besteht aus einer mehr wagrechten Bewegung der Wassertheilchen. Aehnlich ist die Fluthwelle, sowie 3. der Schwall (swell). Derselbe besteht aus einem oder mehreren weit durch das Meer fortgehenden Wasserdämmen von 4—5^m Höhe, die durch Thäler von 100 und mehr Meter Breite von einander getrennt sind. Regelmäßige Schwalle entstehen durch lange nach derselben Richtung wehende Winde und durch Meeresströme, unregelmäßige durch Wirbelstürme und Erdbeben; ein solcher Erdbebenschwall geht, wie 1868, den ganzen großen Ocean hindurch. 4. Die Bachwellen, welche von periodischer Ab- und Zunahme der Geschwindigkeit des Fließens herrühren und auch in Stromschnellen auftreten.

223 **Die Wellenbewegung im Allgemeinen.** Wie die Flüssigkeiten durch einen äußeren, localen Oberflächendruck und durch ihre eigene Schwere in Schwingungen gerathen, so können auch die größeren oder kleineren Theile alle Körper durch eine äußere Kraft und durch die Elasticität oder die Molekularkräfte der Körper in Schwingungen versetzt werden. Auch diese Bewegung wird Wellenbewegung genannt; denn auch hier bildet eine ursprünglich gerade Reihe von Molekülen, wenn das erstere derselben durch eine Kraft aus derselben getrieben wird, und wenn die Bewegung sich auf die folgenden fortgepflanzt hat, eine oder mehrere Wellen. Dies ergibt leicht eine Betrachtung der Art, wie diese Bewegung sich fortpflanzt. Wird (Fig. 123) das Theilchen a durch eine Kraft nach a′ gebracht, so ist dasselbe jetzt weiter von b entfernt als vorher; da

Fig. 123.

aber die Abstoßung viel rascher abnimmt als die Anziehung, so ist die Abstoßung viel, die Anziehung nur wenig kleiner geworden; folglich wird b von a′ jetzt stärker angezogen als vorher; da es aber auch von c angezogen wird, so muß es sich nach b′ hin bewegen, während a weiter nach a″ geht; a″ wirkt nun ebenso auf b′ und zieht dasselbe nach b″ herab, während b′ in Gemeinschaft mit d ebenso auf c wirkt, wie a′ und c vorher auf b gewirkt haben, wodurch c nach c′ gelangt. Es ist leicht ersichtlich, daß a″, b″, c′ und d auf diese Weise schon ein halbes Wellenthal bilden; verfolgt man die Bewegung in dieser Weise weiter fort, wenn a″ in die Lage a zu-

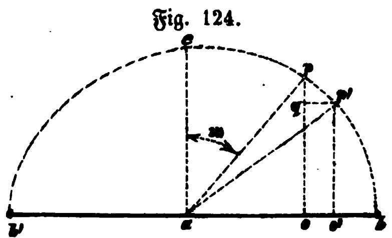
rückkehrt, über diese hinausgeht und endlich wieder nach a zurückkommt, so findet man, daß während dieser Zeit sich eine vollständige Welle gebildet hat. Es entsteht also auch hier eine fortschreitende, transversale Wellenbewegung, für welche ebenfalls der Satz gilt, daß die Wellenlänge gleich dem Wege ist, um welchen sich die Bewegung während einer Schwingungszeit fortgepflanzt hat. Werden die Theilchen durch die Kraft in der Richtung der Molekülreihe voranbewegt, wie es bei longitudinalen Schwingungen der Fall ist, so findet bei dem Voranschreiten der Theilchen eine Verdichtung, bei dem Rückgange über die Gleichgewichtslage hinaus eine Verdünnung statt; hier fehlt zwar die Wellenform, sie entspricht aber doch, wie wir später zeigen werden, dem inneren Vorgange der Bewegung; man nennt diese Bewegung daher doch Wellenbewegung, und Verdichtung und Verdünnung zusammen eine Welle, für deren Länge der eben angeführte Satz ebenfalls gilt.

Beziehungen zwischen den Größen der Wellenbewegung elastischer Körper. 224
1. Die Wellenlänge sei $= l$, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $= c$, die Schwingungsdauer $= T$, die Zahl der Schwingungen in 1 Sec., kurz die Schwingungszahl genannt $= n$, so ist $T = 1/n$ Secunde. Da die Wellenlänge l gleich dem Wege ist, den die Bewegung in der Zeit T zurücklegt, so bestehen die wichtigen Beziehungen $l = cT$ und $l = c : n$ oder $c = nl$ oder $n = c : l$. . . . . (25) Grundformeln der Wellenbewegung, durch welche man aus der Schwingungszahl und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit die Wellenlänge (und umgekehrt) berechnen kann.

2. Ebenso wichtig ist eine Beziehung zwischen dem Wege s, um welchen sich ein schwingendes Theilchen aus seiner Gleichgewichtslage entfernt hat, und welchen man Elongation nennt, und zwischen der Zeit t, die für diesen Weg nöthig war, und die man Phasenzeit genannt hat, sowie eine Beziehung zwischen der Geschwindigkeit v in dieser Phase und der Phasenzeit t. Wir wollen diese Beziehungen auf elementarem Wege nach Ettingshausen ableiten. Dabei ist eine Annahme darüber nöthig, wie die ein Theilchen in seine Gleichgewichtslage zurücktreibende Kraft mit dem Wege s zusammenhängt; wenn wir uns erinnern, daß die zurücktreibende Kraft die Elasticität ist, und daß (nach 65.) die Elasticität der Größe der Aenderung proportional ist, so erscheint die Annahme gerechtfertigt, die zurücktreibende Kraft sei dem Wege s proportional.

Geht also ein Theilchen von der Masse m durch eine äußere Kraft aus seiner Gleichgewichtslage a (Fig. 124) heraus nach b hin, so wird vermöge der Elasticität, die dasselbe zurücktreibt, seine Geschwindigkeit immer kleiner, bis sie endlich in b gleich Null ist; dann kehrt das Theilchen mit zunehmender Geschwindigkeit nach a zurück und geht vermöge des Gesetzes der Trägheit über a hinaus, wo es seine größte Geschwindigkeit besitzt. Denn, sowie es über a hinaus nach b′ hin geht, erwacht wieder die Elasticität und zieht das Theilchen nach a zurück, wodurch seine Geschwindigkeit in b′ gleich Null wird; nun kehrt das Theilchen abermals nach a zurück und hat nun eine Schwingung vollendet. Diese Schwingungen wiederholen sich, wenn keine Hindernisse eintreten und keine äußeren Kräfte einwirken, nach dem Princip der Erhaltung der Kraft ohne Ende. Bezeichnen wir die Kraft, welche die Masse = 1 in der Entfernung = 1 zurücktreibt, mit k, so ist in der Entfernung $ao = s$ die Kraft für unser Theilchen $= mks$. Wenn diese Kraft dem Theilchen in der Zeit dt, in welcher es von o nach o′ gelangt, die Geschwindigkeit dv nimmt, so erhalten wir nach Formel (8) für dieselbe Kraft einen zweiten Ausdruck, nämlich $m . dv : dt$. Setzen wir diese Ausdrücke einander gleich, so entsteht $dv : dt = ks$. Bezeichnen wir den kleinen Weg oo′ mit ds und multipliciren die letzte Gleichung mit ds, so entsteht $v . dv : k = s . ds$, weil nämlich

Fig. 124.



$ds : dt = v$. Da nun $k = \sqrt{k} . \sqrt{k}$, so kann man auch schreiben $(v : \sqrt{k}) . (dv : \sqrt{k}) = s . ds$, oder ds zu $(dv : \sqrt{k}) = (v : \sqrt{k})$ zu s. Um diese Proportion in unserer Figur darstellen zu können, errichten wir in o und o' Senkrechte $op = v : \sqrt{k}$ und $o'p' = (v - dv) : \sqrt{k}$, ziehen $p'q$ parallel ab, sowie pa, $p'a$ und pp'; dann ist $p'q = ds$ und $pq = op - o'p' = v : \sqrt{k} - (v - dv) : \sqrt{k} = dv : \sqrt{k}$; folglich lautet unsere Proportion jetzt $p'q : pq = op : ao$. Weil diese proportionalen Linien die Katheten der zwei rechtwinklichen Dreiecke $pp'q$ und apo sind, so müssen diese Dreiecke einander ähnlich sein; folglich ist Winkel $pp'q = apo$; da aber $pp'q + p'pq = 90^0$, so ist auch $apo + p'pq = 90^0$, d. h. der Winkel app' muß ein Rechter sein. Mit anderen Worten: Wenn man in jedem Punkte des Weges Lothe errichtet, die gleich der Geschwindigkeit dividirt durch $\sqrt{k}$ sind, und wenn man die Endpunkte dieser Lothe verbindet, so entsteht eine Linie, deren Elemente senkrecht auf den nach einem Punkte a gezogenen Linien stehen; folglich ist jene Verbindungslinie ein Kreis, dessen Mittelpunkt a und dessen Radius die Schwingungsweite $ab = r$ ist. Demnach ist das in a errichtete Loth $ae = r = u : \sqrt{k}$, wenn u die größte, in a stattfindende Schwingungsgeschwindigkeit ist, woraus folgt, daß $u = r\sqrt{k}$ ist. — Wegen der Aehnlichkeit der genannten Dreiecke ist nun auch $pp' : qp' = ap : op$ oder $pp' : ds = r : (v : \sqrt{k})$, woraus $pp' = r . ds \sqrt{k} : v = r \sqrt{k} . (ds : v) = r \sqrt{k} . dt$, weil $ds : v = dt$ ist. Der Ausdruck dt ist das Zeittheilchen für den Weg ds, dem der Bogen pp' entspricht; dem Bogen ep entspricht die Zeit t; folglich ist $ep = rt . \sqrt{k}$. Für diesen Bogen haben wir auch den Werth rw, wenn w den Winkel eap bezeichnet; daher ist $rw = rt . \sqrt{k}$ oder $w = t\sqrt{k}$. Jetzt ist es möglich, Werthe für die Elongation und die Geschwindigkeit zu finden. Denn die Elongation $s = ao = ap . \sin apo = r \sin w = r \sin (t \sqrt{k})$, und $op = v : \sqrt{k}$ ist $= ap . \cos apo = r \cos w = r \cos (t \sqrt{k})$, woraus sich ergibt

$$s = r \sin (t \sqrt{k}) \text{ und } v = r \sqrt{k} \cos (t \sqrt{k}) = u \cos (t \sqrt{k}) \quad . \quad . \quad . \quad (26)$$

in welchen zwei Formeln der Zusammenhang zwischen Elongation, Phasengeschwindigkeit und Phasenzeit ausgesprochen ist. Indessen kommt in diesen Formeln noch die unbekannte Kraft k vor; wir können dieselbe eliminiren, wenn wir den Werth für den Bogen $ep = rt . \sqrt{k}$ auf eine Viertelschwingung anwenden. Der zu dieser gehörende Bogen ist $= \frac{1}{2} r\pi$ und die zugehörige Zeit ist $\frac{1}{4}$ T, wenn T die ganze Schwingungszeit bedeutet; folglich ist $\frac{1}{2} r\pi = \frac{1}{4} rT . \sqrt{k}$, woraus

$$T = 2\pi : \sqrt{k} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (27)$$

eine wichtige Formel, welche wir gleich am Schlusse dieser Entwicklung noch näher betrachten wollen. Nehmen wir aus derselben den Werth für $\sqrt{k} = 2\pi : T$ und setzen denselben in die Formeln (26) ein, so erhalten sie eine von k freie Gestalt:

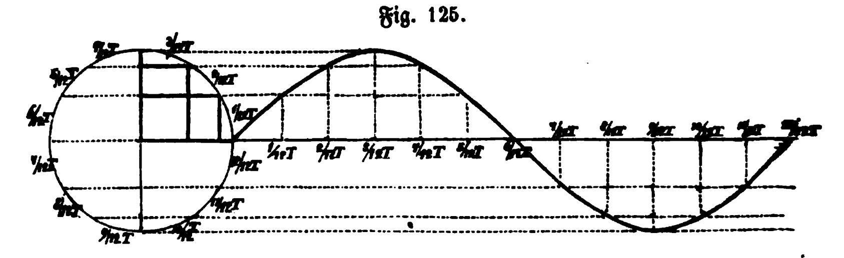
$$s = r \sin (2\pi t : T) \text{ und } v = r (2\pi : T) \cos (2\pi t : T) = u \cos (2\pi t : T) \quad . \quad . \quad (28)$$

Diese beide Formeln geben uns ein vollkommenes Bild der Schwingungsbewegung; denn setzen wir für die Phasenzeit die in der folgenden Reihe angegebenen Werthe, so ergeben sich für die Elongation und die Geschwindigkeit immer die unter den Werthen stehenden Größen, aus denen die hin- und hergehende Bewegung zu erkennen ist.

Ist $t =$	o	$\frac{1}{4}$T	$\frac{1}{2}$T	$\frac{3}{4}$T	T	$\frac{5}{4}$T	$\frac{3}{2}$T	$\frac{7}{4}$T	2T	$\frac{9}{4}$T	$\frac{5}{2}$T	$\frac{11}{4}$T	3T
so ist $s =$	o	r	o	—r	o	r	o	—r	o	r	o	—r	o
und $v =$	u	o	—u	o	u	o	—u	o	u	o	—u	o	u.

Auch läßt sich hieraus eine graphische Darstellung der Schwingungsbewegung gewinnen, welche die innere Uebereinstimmung derselben mit der Wellenbewegung des Wassers sofort ins Auge springen läßt. Trägt man nämlich die 12 Theile von T als Zwölftel eines Kreisumfanges (Fig. 125), dessen Radius $= r$ ist, auf, so geben die Sinusse

Fig. 125.



der Bogen, d. i. die betreffenden senkrechten Halbsehnen die Elongationen und die Cosinusse d. i. die wagrechten Halbsehnen die Geschwindigkeiten an. Wenn man nun die Zeiten auf einer Verlängerung des wagrechten Durchmessers aufträgt, an den einzelnen Punkten Lothe gleich den senkrechten Halbsehnen errichtet und die Endpunkte derselben verbindet, so entsteht eine Wellenlinie als Darstellung der Schwingungsbewegung. Wenn demnach bei

der transversalen Schwingungsbewegung im Inneren eines Mediums oder bei der longitudinalen Wellenbewegung im Allgemeinen die Wellenform auch gar nicht vorkommt, so entspricht sie doch dem inneren Wesen dieser Bewegungen; es dürfen daher die Eigenschaften der letzteren aus denen der förmlichen Wellenbewegung geschlossen werden und der Name Wellenbewegung erscheint demzufolge auch für jene gerechtfertigt.

225

Die Formel (27) $T = 2\pi : \sqrt{k}$ enthält nicht die Amplitude r; folglich ist die Schwingungszeit von der Amplitude unabhängig, ähnlich wie die Zeiten kleiner Pendelschwingungen von der Größe des Schwingungsbogens unabhängig sind; die Schwingungen eines elastischen Körpers sind isochronisch. Man kann dies leicht mit einem senkrecht aufgehängten und mit einem Gewichte beschwerten Spiraldrahte zeigen; derselbe macht in gleichen Zeiten gleich viele große und kleine Schwingungen. Hierin unterscheiden sich die Schwingungen elastischer Körper sehr von der durch den hydrostatischen Druck und die Schwere erzeugten Wellenbewegung der Flüssigkeiten. Während bei dieser die Schwingungszeiten als Fallzeiten von der Wellenhöhe oder Amplitude abhängig sind, aber fast unabhängig von der Natur der Flüssigkeit, erfolgen die Schwingungen elastischer Körper unabhängig von der Amplitude, aber abhängig von der Natur des Körpers; denn die in der Formel für T auftretende Größe k für die Elasticität ist in verschiedenen Körpern verschieden. — Ein ähnlicher Unterschied zeigt sich auch in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c. Um für diese aus Formel (25) $l = c \cdot T$ einen Werth ableiten zu können, der ihre Abhängigkeit von der Natur des Körpers ausspricht, müssen wir zuerst für T einen Werth gewinnen, in welchem an Stelle der unbekannten und unmeßbaren Größe k eine andere bekannte und meßbare Größe für die Elasticität steht; wir müssen also k mit dem Elasticitätsmodul e in Zusammenhang bringen. Dieser Modul e ist in unserem Falle die Kraft, welche die Molekülreihe einer Welle, deren Querschnitt = 1 ist, doppelt so lang zu machen im Stande ist, wenn diese Kraft in der Richtung dieser Reihe, also nur in einer Richtung wirkt. In unserem Falle wirkt aber die Elasticität nicht blos in der Richtung der einen eben in Betracht gezogenen Molekülreihe, sondern in allen Richtungen einer Ebene, z. B. der Ebene des Papiers; folglich wirkt nicht blos e, sondern $2\pi \cdot e$, denn durch die Multiplication mit 2π geschieht der Uebergang von einer Richtung in einer Ebene zu allen Richtungen in derselben. Aus demselben Grunde muß noch einmal mit 2π multiplicirt werden, weil die Elasticitätskräfte auf die Molekülreihe nicht blos in der einen Ebene, sondern in allen durch die Reihe denkbaren Ebenen wirken. Es ist demnach $2\pi \cdot 2\pi \cdot e$ die Kraft der Elasticität, welche die Molekülreihe um l verlängert; soll die Verlängerung nur = 1 sein, so ist die Kraft auch l mal kleiner (nach 65.), folglich ist $2\pi \cdot 2\pi \cdot e : l$ die Kraft, welche auf die Molekülreihe l wirkt. Hat die Volumeneinheit derselben die Masse d, so hat diese ganze Reihe, weil e sich auf den Querschnitt 1 bezieht, die Masse ld; demnach ist die auf die Masse = 1 wirkende Kraft $= (4\pi^2 e : l) : l d$; diese in der Entfernung 1 auf die Masse 1 wirkende Kraft ist aber unser k; folglich ist $k = 4\pi^2 e : l^2 d$.

Setzen wir diesen Werth für k in die Formel (27) für T ein, so ergibt sich

$$T = 2\pi : \sqrt{(4\pi^2 e : l^2 d)} \text{ oder } T = l \sqrt{(d : e)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (29)$$

und wenn wir endlich diesen Werth in den aus Formel (25) sich ergebenden Werth für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit $c = l : T$ einführen, so finden wir $c = l : l \sqrt{(d : e)}$ oder

$$c = \sqrt{(e : d)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (30)$$

Diese Formel für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zeigt uns, daß diese Größe sowohl von der Amplitude, wie auch von der Schwingungsgeschwindigkeit oder Schwingungszahl unabhängig ist. Große und kleine Schwingungen, schnelle und langsame Schwingungen pflanzen sich in demselben Körper mit gleicher Geschwindigkeit fort; in verschiedenen Körpern geschieht die Fortpflanzung direct proportional zu der Quadratwurzel aus dem Elasticitätsmodul und umgekehrt proportional zu der Quadratwurzel aus der Dichte, aber ebenfalls unabhängig von der Weite und der Dauer der Schwingungen. Die Wellenbewegung der Flüssigkeiten dagegen pflanzt sich um so schneller fort, je höher die Wellen sind, und je rascher die Theilchen oscilliren.

Die angeführten Formeln und daraus geschlossenen Gesetze gelten nur unter der Voraussetzung, unter welcher sie erhalten wurden, nämlich daß die zurückführende Kraft dem Abstande direct proportional sei; gilt diese Voraussetzung nicht, so treten Abweichungen von den Gesetzen ein.

Die Formeln (28) gelten für die Elongation und Phasengeschwindigkeit eines durch äußere Kraft bewegten Punktes, also z. B. für das erste Molekül einer Welle. Sie [illegible] aber leicht für jedes beliebige Molekül der Welle zu erweitern, welches um x von [illegible] ersten absteht, und in welchem die Bewegung nach der Zeit t' anlangt, für die nach Formel (25) die Relation $c = x : t'$ oder $t' = x : c$ gilt; für dieses Molekül ist die

Phasenzeit $= t - t'$, daher der Werth für die Elongation $s = r \sin [2\pi (t - t') : T)] = r \sin [2\pi (t : T - x : cT)]$ oder da $cT = l$ ist, $s = r \sin [2\pi (t : T - x : l)]$ und ebenso $v = u \cos [2\pi [t : T - x : l)]$ .... (31)

226 **Das Zusammentreffen oder die Interferenz mehrerer fortschreitenden Wellenbewegungen** (Fresnel 1830). 1. Die Interferenz mehrerer Wellen von gleicher Fortpflanzungsrichtung, von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Pflanzen sich in derselben Molekülreihe zwei Wellen mit verschiedenen Anfangspunkten fort, so erhält jedes Molekül durch jede der beiden Wellen eine bestimmte Schwingungsweite oder Amplitude; gehen diese Bewegungen nach einer Richtung, so ist die Amplitude des Moleküls gleich der Summe der beiden Amplituden; gehen dieselben nach entgegengesetzter Richtung, so ist der Weg des Moleküls gleich der Differenz der Amplituden, kann also auch gleich Null sein, wenn nämlich die Amplituden einander gleich sind. Das erste wird der Fall sein, wenn die beiden Wellen ganz auf einander fallen, wenn sie also von einem Punkte ausgehen, oder auch von zwei Punkten, die um ganze Wellenlängen von einander entfernt sind, wenn also, wie man sagt, die Phasendifferenz gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen ist; das letzte dagegen muß eintreten, wenn der Berg der einen Welle direct das Thal der anderen bedeckt, wenn also die beiden Wellen von Punkten ausgehen, die um $1/2$ Wellenlänge von einander abstehen, oder auch um $3/2$, $5/2$, $7/2$ u. s. w. Wellenlängen, kurz wenn die Phasendifferenz gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen ist. *Wenn die Ausgangspunkte zweier gleich langen Wellen von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Fortpflanzungsrichtung um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, so verstärken die Wellen einander; sind aber die Ausgangspunkte um eine ungrade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt, so schwächen die Wellen einander und heben bei gleichen Amplituden einander auf.*

Schärfer erhellt dies aus der mathematischen Betrachtung: Die Elongation eines Theilchens durch eine Welle ist nach Fl. (31) $s = r \sin [2\pi (t : T - x : l)]$; ist nun der Anfangspunkt der zweiten Welle um a von dem der ersten entfernt, so hat dasselbe Theilchen von diesem zweiten Anfangspunkte die Entfernung $x - a$; folglich ist seine Elongation $s_1 = r_1 \sin [2\pi (t : T - (x - a) : l)]$. Da dasselbe Theilchen diese beiden Elongationen erhält, so ist sein Gesammtweg $S = r \sin [2\pi (t : T - x : l) + r_1 \sin [2\pi (t : T - (x - a) : l)]$. Um aus dieser Gleichung die Schwingungsweite ersehen zu können, müssen wir dieselbe auf die Gestalt der Formeln (31) bringen, in welchen r die Amplitude bedeutet. Dies geschieht dadurch, daß wir den letzten Sinus nach der Formel für den Sinus einer Summe entwickeln; hiernach ist nämlich $\sin [2\pi (t : T - x : l + a : l) = \sin [2\pi (t : T - x : l)] \cos [2\pi (a : l)] + \cos [2\pi (t : T - x : l)] \sin 2\pi [(a : l)]$. Setzen wir diesen Werth in S ein und scheiden gemeinschaftliche Factoren aus, so ergibt sich

$S = \sin [2\pi (t : T - x : l)] \{r + r_1 \cos [2\pi (a : l)]\} + \cos [2\pi (t : T - x : l)] r_1 \sin [2\pi (a : l)]$.

Bestimmen wir nun zwei Größen R und D so, daß

$R \cos [2\pi (D : l)] = r + r_1 \cos [2\pi (a : l)]$ und $R \sin [2\pi (D : l)] = r_1 \sin [2\pi (a : l)]$

und setzen wir diese beiden Werthe in den Werth für S, so ergibt sich

$S = R \sin [2\pi (t : T - x : l)] \cos [2\pi (D : l) + R \cos [2\pi (t : T - x : l)] \sin [2\pi (D : l)]$ oder

$S = R \sin [2\pi (t : T - (x - D) : l)]$. Jetzt ist die neue Elongation auf der allgemeinen Elongationenform; folglich ist R die neue Amplitude. Wie groß dieselbe ist, ergibt sich aus den zwei Bestimmungsgleichungen für R und D, wenn wir diese quadriren und dann addiren:

$R^2 \cos^2 [2\pi (D : l)] = r^2 + 2rr_1 \cos [2\pi (a : l)] + r_1^2 \cos^2 [2\pi (a : l)]$; hierzu

$R^2 \sin^2 [2\pi (D : l)] = \qquad r_1^2 \sin^2 [2\pi (a : l)]$, ergibt

$R^2 = r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos [2\pi (a : l)]$, woraus $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos [2\pi (a : l)])}$, ein Ausdruck, der uns durch die Uebereinstimmung mit der Fl. (14) für das Parallelogramm der Kräfte zeigt, daß die Zusammensetzung der Schwingungen ganz nach den Regeln der Mechanik geschieht. Ist nun die Phasendifferenz $a = nl$, d. i. gleich einer ganzen Anzahl von Wellenlängen, so ist $\cos 2\pi (a : l) = \cos 2n\pi = 1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1)} = r + r_1$. Ist dagegen a gleich einer ungeraden Anzahl von halben

Wellenlängen, also $a = (2n + 1) \cdot \frac{1}{2} l$, so ist $\cos[2\pi(a : l)] = \cos[(2n + 1)\pi] = -1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 - 2rr_1)} = r - r_1$; wenn $r = r_1$, so ist $R = o$; hiermit sind obige Sätze bewiesen.

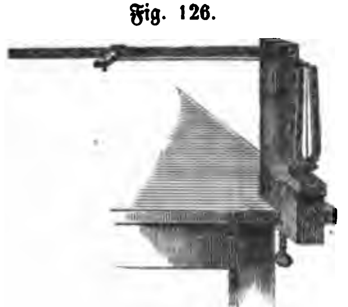
Diese sehr wichtigen Erscheinungen lassen sich mit Fessels Wellenmaschine zeigen; auch kann man sie in Wasser oder in Quecksilber hervorrufen, wenn man zwei Wellensysteme erregt; wo Berg und Berg zusammentreffen, zeigt sich ein höherer Berg; wo Thal und Thal auf einander kommen, ein tieferes Thal, wo aber Berg und Thal zusammentreffen, erscheint die Bewegung stark vermindert oder ganz aufgehoben. Sonst schreitet ein Wellensystem ungehindert durch das andere fort.

227 2. Die Interferenz mehrerer Wellen von entgegengesetzter Fortpflanzungsrichtung, aber gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Zwei Wellen, deren Anfangspunkte um eine Wellenlänge von einander abstehen, und die gleiche Längen und Amplituden haben, liegen nach einer Schwingungszeit so auf einander, daß Berg und Thal sich gegenseitig aufheben und decken, alle Theilchen sind gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, gehen also auch gleichzeitig aus derselben heraus. Nach weiterem Verlauf von 1/4 Schwingungszeit werden die Thäler beider Wellen in der Mitte zwischen den zwei Anfangspunkten stehen und ein doppelt so tiefes Thal bilden, während zu beiden Seiten dieses Thales halbe Berge auf einander treffen und dadurch halbe Berge von doppelter Höhe bilden. Die Punkte zwischen diesen Bergen und dem Thale sind in der ursprünglichen Lage in Ruhe; sie mußten auch bisher in Ruhe sein, denn so viel sie durch das Thal der einen Welle erniedrigt wurden, ebenso viel mußten sie durch den ebenso hohen Berg der andern Welle erhöht werden. Dies geht in gleicher Weise in dem folgenden Viertel der Schwingungszeit fort, und an dem Schlusse dieses Viertels, wo wieder Berge und Thäler über einander stehen, sind nicht blos diese zwei Punkte, sondern alle in der ursprünglichen Lage. Nach dem dritten Viertel der zweiten Schwingungszeit sind die zwei Berge in die Mitte gelangt und bilden einen höheren Berg, während beiderseits halbe tiefere Thäler stehen, und wieder dieselben Punkte, die um 1/4 der Wellenlänge von den Anfangspunkten abstehen, in der ursprünglichen Lage geblieben sind; nach vollem Verlaufe der zweiten Schwingungszeit ist wieder Alles in der ursprünglichen Lage. Da alle Theilchen immer gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, also auch gleichzeitig in den äußersten Lagen sind, so besteht die beschriebene Erscheinung aus einer ganzen und zwei halben stehenden Wellen, welche durch ruhende Punkte in 1/4 und 3/4 der Wellenlänge von einander getrennt sind. Diese ruhenden Punkte zwischen stehenden Wellen werden **Schwingungsknoten**, die am weitesten ausschreitenden Punkte **Schwingungsbäuche** genannt. Die Schwingungsknoten sind nicht etwa als Punkte anzusehen, die von den zwei Wellenbewegungen ganz unberührt bleiben; sie sind vielmehr die Durchgangspunkte zweier Bewegungen, welche an diesen Punkten gleich und entgegengesetzt sind; die Knoten erhalten jeden Augenblick zwei Bewegungen und pflanzen sie nach beiden Seiten hin fort, bleiben aber selbst in Ruhe oder wenigstens in stets wechselnder unendlich kleiner Bewegung nach beiden Seiten, weil jede Geschwindigkeit nach der einen Seite hin sofort durch eine nach der entgegengesetzten Seite hin aufgehoben wird. Ein Schwingungsknoten ist von einem Schwingungsbauche um eine halbe stehende Wellenlänge oder um ein Viertel der Länge der fortschreitenden Wellen entfernt, durch deren Interferenz sich die stehenden Wellen bilden. — **Durch Interferenz entgegengesetzt fortschreitender Wellen entstehen stehende Wellen von der halben Länge der fortschreitenden Wellen; je zwei nebeneinander liegende stehende Wellen sind in entgegengesetzten Phasen und durch Schwingungsknoten getrennt.** Allgemeiner folgt dies aus der mathematischen Betrachtung.

Die Elongation eines Theilchens der ersten Welle ist nach Formel (31) $s = r \sin [(2\pi (t:T - x:l)]$. Ist nun der Abstand der beiden Anfangspunkte $= a$, so ist der Abstand des Theilchens von dem 2. Anfangspunkte $= a - x$; also ist die Elongation des Theilchens durch die 2. Welle $= r \sin [2\pi (t:T - (a - x):l)]$; die Gesammtelongation ist daher $S = r \sin [2\pi (t:T - x:l)] + r \sin [2\pi (t:T - (a - x):l)]$. Benutzen wir nun die bekannte trigonometrische Formel für die Summe zweier Sinusse $\sin a + \sin b = 2 \sin {}^1/_2 (a + b) \cos {}^1/_2 (a - b)$, so ergibt sich $S = 2r \sin [2\pi (t:T - a:2l)] \cos [\pi (a - 2x):l)]$ oder $S = 2r \cos [\pi (2x - a):l)] \sin [2\pi (t:T - a:2l)]$. Dieser Ausdruck ist nun auf der allgemeinen Elongationsform. Der erste Theil desselben $2r \cos [\pi (2x - a):l]$ gibt die Amplitude an. Dieselbe ist gleich Null, wenn $\cos [\pi (2x - a):l]$ gleich Null ist, d. h. wenn (für $a = l$) $x = {}^1/_4 l$, ${}^3/_4 l$, ${}^5/_4 l$ u. s. w. ist; an diesen Stellen sind also die Punkte in Ruhe, hier sind Schwingungsknoten. Ist $x < {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus positiv, also auch die Amplitude positiv; ist $x > {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus negativ, also auch die Amplitude negativ; zu beiden Seiten eines Knotens finden sich entgegengesetzte Phasen; der zweite Theil unseres Ausdruckes für die Gesammtelongation gibt die Abstände der Theilchen von der Gleichgewichtslage an; da in demselben x gar nicht vorkommt, so sind diese Abstände von x unabhängig; die Theilchen durchlaufen alle gleichzeitig die Gleichgewichtslage, erreichen also auch gleichzeitig ihre äußersten Lagen, kurz es bilden sich stehende Wellen.

Auch diese Erscheinungen sind mit Fessels Wellenmaschine zu zeigen; mit einiger Uebung lassen sie sich auch an einem Seile oder an einem mit Sand gefüllten Kautschukschlauche hervorrufen, der an einem Ende befestigt und an dem anderen Ende lose mit der Hand hin- und herbewegt wird. Es werden alsdann die an dem Schlauche hinlaufenden Wellen an dem festen Ende zurückgeworfen und bilden durch Interferenz mit neu erregten Wellen Schwingungsknoten und stehende Wellen. Auch durch Interferenz fortschreitender Wasserwellen mit reflectirten Wellen lassen sich stehende Wellen erzeugen. Indessen sind hier wie bei allen durch Reflexion erzeugten stehenden Wellen, die letzten Knoten nicht halb soweit von den Enden entfernt als von den nächsten Knoten, sondern ihre Abstände von den Endpunkten sind ebenso groß, wie ihre Abstände von einander; es rührt dies davon her, daß, wie sich bei der Reflexion (231.) ergeben wird, die reflectirte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, wodurch sich die Knoten um ¼ dieser Länge verschieben. Am schärfsten und mannichfaltigsten sind diese Erscheinungen an Meldes (1860) Stimmgabelapparat (Fig. 126) hervorzurufen. Mit einer Stimmgabel ist ein Faden verbunden, der mit dem Stifte eines auf einem Lineale verschiebbaren Schlittens verknüpft ist und daher nach Belieben länger und kürzer gespannt werden kann. Wenn nun die Stimmgabel zum Tönen, d. i. zum Schwingen gebracht wird, so pflanzen sich die Schwingungen auf den Faden fort, werden an dem Stifte reflectirt und bilden mit neu ankommenden Schwingungen stehende Wellen; diese entstehen aber nur dann, wenn die Fadenlänge ein Ein- oder Vielfaches von der halben Länge der Welle ist, welche die Gabel in dem Faden hervorruft; man kann diese Bedingung durch Spannen und Verlängern des Fadens erfüllen. Ist der Faden an den beiden Enden mit Stimmgabeln verbunden, so erhält man die stehenden Wellen ohne das Hilfsmittel der Reflexion. — Befestigt man nach Matthiessen (1868) an die beiden Zinken einer Stimmgabel dünne Stifte und läßt deren Spitzen in Flüssigkeit tauchen, während die Stimmgabel tönt, so entstehen kleine Kräuselwellen, die zwischen den Spitzen zu stehenden Wellen interferiren; die Ursache dieser Wellen ist die Elasticität der Flüssigkeitshaut; daher folgen sie den zuletzt gefundenen Gesetzen, nicht aber den Gesetzen der durch die Schwere erzeugten großen Wasserwellen.

Fig. 126.



228 3. Interferenz von Wellen verschiedener Schwingungsrichtung. Wie in einer Reihe von Molekülen sich nach einer oder nach entgegengesetzter Richtung solche Schwingungen fortpflanzen können, die nach einer Richtung vor sich gehen, so können die Schwingungsrichtungen auch einen Winkel mit einander machen. Hierdurch erfährt jedes Molekül eine Wirkung durch zwei nach verschiedenen Richtungen gehende Kräfte; welchen Weg es dabei einschlägt, ist nach dem Satze von dem Parallelogramm der Kräfte zu berechnen. Vollzieht man eine solche Rechnung, so ergibt sich aus den Lehren der analytischen Geometrie, daß allgemein gefaßt der

Weg des Moleküls die Form einer Ellipse haben muß, welche in eine gerade Linie übergeht, wenn die Phasendifferenz = 0 ist, und in einen Kreis, wenn die Schwingungsrichtungen auf einander senkrecht stehen, und die Amplituden einander gleich sind.

Die Vereinigung zweier Schwingungsbewegungen läßt sich beobachten an Meldes (1862) Universalkaleidophon (καλός = schön, εἶδος = Gestalt, φωνή = Ton). Dasselbe besteht aus einer festgeklemmten Lamelle, die eine zweite Klemme zur Aufnahme einer zweiten Lamelle mit einem glänzenden Knopfe trägt. Setzt man die beiden Lamellen gleichzeitig in Schwingungen, so entstehen allerlei leuchtende Schwingungscurven.

Wie sich zwei Schwingungsbewegungen zu einer neuen componiren, so kann und muß auch die Vereinigung von mehr als zwei solcher Bewegungen stattfinden, wenn diese sich in derselben Molekülreihe fortpflanzen; die Vereinigung geschieht hierbei immer nach dem Parallelogramm der Kräfte. Hierdurch kann die Bahnform der schwingenden Theilchen sich noch weiter von der geraden Linie entfernen als in der elliptischen oder kreisförmigen Bahn; alle nur denkbaren geschlossenen Curven mit unzähligen Einbiegungen, Zacken und anderen kleineren Veränderungen können vorkommen. Kann ein Medium Wellen von den verschiedensten Längen annehmen, so können auch die verschiedensten Wellen interferirend auf einander wirken, jedoch nur so weit, als sie sich auf dieselben Theile des Mediums erstrecken; treten sie aus dem gemeinschaftlichen Theile heraus, so pflanzen sie sich, ungeändert durch die vorhergegangene Interferenz, in derselben Weise weiter fort, als ob keine Interferenz stattgefunden hätte. Man nennt diese ungestörte Fortpflanzung verschiedener Wellen durch ein und dasselbe Medium die Superposition kleinster Schwingungen; sie gilt wirklich nur für kleinste Schwingungen; bei endlicher Amplitude dagegen entstehen secundäre Wellenbewegungen. Noch beschränkter ist die Erscheinung in einem Medium, das für eine bestimmte Schwingungsbewegung abgestimmt ist; ein solches vermag nur Wellen von der Länge dieser Bewegung auszuführen und außerdem noch Wellen von 2, 3, 4 ... fach kürzerer Länge, weil alle anderen Wellen unregelmäßig reflectirt und so zersplittert werden. Jene Hauptwelle nun kann und muß mit diesen Wellen zu einer neuen verwickelten, aber doch regelmäßigen Schwingungsbewegung interferiren, weil in diesem Falle auf eine längere Welle mehrere kürzere immer an denselben Punkten treffen und nur dann die sämmtlichen Combinationswellen einander gleich sind. Sowie aber nach dem Parallelogramm der Kräfte eine zusammengesetzte Bewegung in ihre Componenten zerlegt werden kann, so kann auch jede noch so verwickelte Schwingungsbewegung der Moleküle wieder in die componirenden Theilbewegungen, in einfache, geradlinige, pendelartige Schwingungen zerlegt werden; und zwar kann ebenso, wie aus mehreren einfachen Wellen eine ganze bestimmte Interferenzwelle hervorgeht, eine bestimmte zusammengesetzte Schwingungsbewegung nur auf eine Art in einfache pendelartige Schwingungen zerlegt werden, deren Schwingungszeiten ganze Vielfache von einander sind (Fouriers Gesetz 1827). Eine solche Zerlegung muß stattfinden, sowie die Schwingungsbewegung auf Gegenstände trifft, die nur pendelartige Schwingungen vollziehen können, ganz in derselben Weise, wie eine schief gerichtete Kraft sich von selbst in Componenten zerlegt, wenn sie auf eine Fläche wirkt, die sich nur senkrecht zu ihrer eigenen Richtung bewegen kann.

Ausbreitung der Wellen. Wie sich eine Wellenbewegung ausbreitet, hängt von der Beschaffenheit des Stoffes ab, in welchem die Bewegung vor sich geht; man nennt denselben das Fortpflanzungsmittel oder das Medium; die Richtung, in welcher sich die Bewegung fortpflanzt, nennt man Strahl oder Radius. Sind auf einem Radius die Dichte und die Elasticität des Mediums unveränderlich, so nennt man das Medium homogen, im entgegengesetzten Falle heterogen; sind die Dichte und die Elasticität in den Richtungen aller nur denkbaren Radien dieselben oder wenigstens in demselben Verhältnisse zu einander, so wird das Medium ein isotropes genannt, anderenfalls ein anisotropes. 229

Von einem Punkte eines isotropen Mediums aus pflanzt sich eine Wellenbewegung nach allen Richtungen fort; denn dieser Punkt ist der Anfangspunkt einer unendlichen Anzahl von Molekülreihen, in welchen allen durch die Bewegung des ersten Punktes eine gleiche Störung des Gleichgewichtes erzeugt wird. — In allen diesen Richtungen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieselbe, weil der dieselbe bestimmende Ausdruck $\sqrt{(e : d)}$ unverändert bleibt. — Die Wellenbewegung pflanzt sich in immer größer werdenden Kugelwellen fort; denn z. B. nach einer Schwing-

ungszeit ist auf allen Molekülreihen die Bewegung um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge fortgerückt; es fangen daher alle Theilchen auf der Oberfläche einer Kugel, deren Radius gleich der Wellenlänge ist, gleichzeitig ihre Bewegung an, vollenden sie in gleichen Zeiten und sind daher immer in gleichen Phasen. Dauert die Erregung fort, so beginnen diese Theilchen nach zwei Schwingungszeiten neue Schwingungen; dasselbe thun dann aber auch alle Theilchen einer zweiten Kugeloberfläche, die von der ersten um eine Wellenlänge concentrisch absteht, weil sich die erste Bewegung während der zweiten Schwingungszeit um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge, von der ersten Kugelfläche aus auf allen Molekülreihen fortgepflanzt hat; es sind daher die Theilchen dieser zwei Kugelflächen in gleichen Phasen. — Eine Fortsetzung dieser einfachen Betrachtung ergibt, daß alle Theilchen solcher um den Anfangspunkt concentrischen Kugelflächen, die um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen, in gleichen Phasen begriffen sind, daß aber die Moleküle derjenigen Kugelflächen sich in entgegengesetzten Phasen befinden, die um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind. — Die Richtungen der Fortpflanzung stehen auf der Wellenoberfläche senkrecht, weil diese Richtungen die Radien von Kugeln sind, und weil die Radien auf den Elementen von Kugelflächen senkrecht stehen. Zieht man nur Flächenelemente in Betracht, so darf man die Wellenoberfläche als eben, einen Schnitt derselben als gerade Linie ansehen; dasselbe darf auch geschehen, wenn der Anfangspunkt sehr weit entfernt ist, z. B. so weit wie die Sonne und die Sterne. — Die Richtungen der Fortpflanzung sind gerade, vom Anfangspunkte ausgehende Linien; denn jede radiale Richtung an einer beliebig großen Kugelwelle ist immer die Verlängerung einer radialen Richtung einer um sehr wenig kleineren Kugelwelle; verfolgt man auf diese Weise die radialen Richtungen auf immer kleinere Kugelwellen, so gelangt man endlich in gerader Richtung zu dem Anfangspunkte.

Die Stärke oder Intensität der Schwingungsbewegung steht in umgekehrtem Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung von dem Anfangspunkte. Denn die Kugelwellen, auf welche sich die anfängliche Bewegung fortpflanzt, werden immer größer und verhalten sich nach einem bekannten geometrischen Satze wie die Quadrate ihrer Radien; da sich nun dieselbe lebendige Kraft, mit welcher der Anfangspunkt sich bewegt, von einer dieser Kugelwellen auf die andere verbreitet, so kann ein und dasselbe Flächenstück von zweien solcher Kugelflächen nicht einen gleichen Betrag von lebendiger Kraft empfangen, sondern dieser Betrag muß in demselben Maße kleiner werden, als die Kugelflächen wachsen. Die lebendige Kraft der Bewegung bestimmt aber die Intensität derselben; folglich steht die Intensität der Bewegung im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Radien der Kugelwellen.

230 **Das Huyghens'sche Princip** (1690). Statt sich vorzustellen, die Schwingungsbewegung eines Moleküls habe sich in einer am Anfangspunkte beginnenden Molekülreihe von Theilchen zu Theilchen bis zu dem Molekül fortgepflanzt, kann man sich nach Huyghens die Ausbreitung der Wellenbewegung auch so denken, daß jedes bewegte Theilchen den Mittelpunkt einer Kugelwelle bilde, und daß demnach die Bewegung eines Moleküls das Resultat der Interferenz unendlich vieler Kugelwellen sei.

Diese Vorstellung führt zu denselben, so eben betrachteten, Folgerungen wie die erste Vorstellung; sie ist berechtigt, weil ja jedes schwingende Theilchen eine Kugelwelle bildet. Durch diese Vorstellung ergibt sich zunächst, daß von einer Kugelfläche aus sich in einer Schwingungszeit eine neue concentrische Kugelwellenfläche von gleicher Phase bildet; denn sind alle Theilchen der ersten Kugelfläche die Mittelpunkte von neuen Kugelwellen, so entstehen rings um die erste Kugelfläche unendlich viele eng neben und in einander liegende Halbkugelwellen von gleichen Radien, weil die Dichte und Elasticität des Mediums überall

dieselben sind. Die Oberflächentheilchen dieser Wellen sind alle in gleichen Phasen mit einander und mit der ersten Kugelfläche; folglich sind auch die äußersten unendlich enge neben einander liegenden Theilchen aller dieser Kugelwellen gleich weit von der ersten Kugelfläche entfernt und in gleicher Phase, bilden also um diese eine zweite concentrische Kugelwelle von gleicher Phase. Ein Blick auf Fig. 127 macht dies vollständig klar. — Wollte man nun gegen diese Vorstellung einwenden, daß durch dieselbe jedes Molekül von unzähligen Anfangspunkten bewegt erscheine und daß demnach die Bewegung des Moleküls unendlich groß sein müsse, so ist dagegen Folgendes zu bemerken: In dem Momente, wo sich die Bewegung des Anfangspunktes in einer Molekülreihe um eine Wellenlänge fortgepflanzt hat, beginnt das letzte Molekül seine Bewegung; jetzt aber gibt es zu jedem Molekül der Reihe immer ein anderes, das sich in entgegengesetzter Phase befindet, weil es von dem ersteren um eine halbe Wellenlänge absteht; die Einwirkungen von je zwei solcher Moleküle auf das letzte heben einander auf. Ganz dasselbe gilt auch von allen anderen ringsum liegenden Theilchen, die ihre Bewegung von dem ersten empfangen haben. Also ist die Wirkung auf das letzte Molekül gerade so, als ob nur das erste sich bewegt hätte. — Diese Vorstellung von Huyghens wird uns manche der folgenden Betrachtungen erleichtern, weßhalb sie besonders zu beachten ist. Experimentell anschaulich machen läßt sie sich durch eine Vorrichtung von Mach (1868): Auf den Mantel a b c d (Fig. 128) eines Cylinders sind Kreise um m und n gezeichnet, welche Elementarkugelwellen vorstellen sollen. Wird nun der Cylinder in Rotation gesetzt, so sieht man zu a b parallele helle und dunkle Streifen, welche uns zeigen, daß die Interferenz der Elementarwellen größere, in diesem Falle, geradlinige Wellen erzeugt.

Fig. 127.

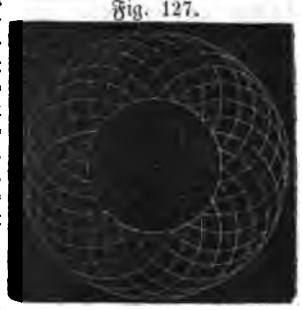
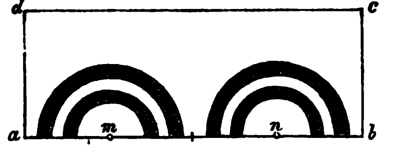


Fig. 128.



231 **Reflexion der Wellenbewegung.** Unter der Reflexion der Wellen versteht man die Erscheinung, daß Wellen an der Oberfläche eines neuen Mediums in das frühere Medium zurückkehren. Nach dem Huyghens'schen Princip wirkt nämlich jedes schwingende Molekül nicht blos vorwärts, in der Richtung der Fortpflanzung der Wellenbewegung, sondern auch rückwärts, da jedes Molekül der Mittelpunkt einer Elementarkugelwelle ist; indessen wird in einem isotropen Medium hierdurch keine rückwärts schreitende Wellenbewegung erzeugt; denn zu jedem Molekül läßt sich immer ein solches finden, das um eine halbe Wellenlänge von demselben entfernt und daher in entgegengesetzter Phase ist; hierdurch heben sich die Rückwirkungen dieser zwei Moleküle auf, weil die von denselben erzeugten Bewegungen vollkommen gleich und entgegengesetzt sind. Ganz anders aber gestaltet sich die Rückwirkung, wenn das Medium eine Veränderung erfährt, dichter oder weniger dicht wird; dann wird jedenfalls die Bewegung der Theilchen der ersten Schicht des neuen Mediums eine andere sein, als diejenige der rückwärts liegenden Theilchen des alten Mediums; es können daher auch die rückschreitenden Theile der Elementarkugelwellen des neuen Mediums nicht mehr in ihrer Wirkung aufgehoben werden, ein größerer oder kleinerer Theil der an dem neuen Medium anlangenden Schwingungsbewegungen muß in das alte Medium zurückkehren, während der übrige Theil sich in veränderter Weise in das neue Medium fortpflanzt. Wenn also eine Wellenbewegung auf ein anderes Medium trifft, so wird sie von demselben theilweise zurückgeworfen oder reflectirt, theilweise, aber in veränderter Art, aufgenommen; jeder von diesen beiden Theilen kann je nach der veränderten Beschaffenheit des Mediums, das eine mal sehr groß, das andere mal verschwindend klein sein, so daß auch eine nahezu vollständige Reflexion denkbar ist, ebenso wie eine nahezu vollständige Aufnahme, welcher letztere Fall bei sehr geringer Verschiedenheit der beiden Medien eintreten wird.

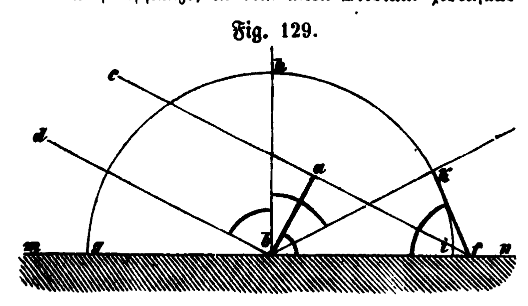
Ist das neue Medium dichter als das alte, so ist die zurückgeworfene Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben. Denn ein gegen die Wand stoßendes Theilchen wird zurückgeworfen, ein z. B. aufwärts gehendes Theilchen wird durch die stärkere Anziehung der dichteren Moleküle abwärts gezogen, kurz jedes Theilchen gelangt in die entgegengesetzte Phase. Langt daher die Welle als Thal an, so kehrt sie als Berg zurück, und umgekehrt; die reflectirte Welle ist gegen die einfallende um $\frac{1}{2}$ Wellenlänge verschoben. — Besonders wichtig ist die Richtung der zurückgeworfenen Welle; es ist gebräuchlich, hierbei die Richtung des bekanntlich auf der Wellenfläche senkrecht stehenden Strahles ins Auge zu fassen, und statt des Winkels, den die Welle mit der reflectirenden Wand einschließt, den gleichen Winkel zu betrachten, den der Strahl mit einem an der Berührungsstelle auf der Fläche errichteten Lothe bildet. Man nennt den Winkel, welchen der Strahl der ursprünglichen Welle mit dem Lothe einschließt, den *Einfallswinkel*, und den Winkel, den der Strahl der zurückgeworfenen Welle mit dem Lothe einschließt, den *Reflexionswinkel*. Für die Reflexion gelten folgende zwei Gesetze:

1. *Der reflectirte Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.*

2. *Der reflectirte und der einfallende Strahl liegen auf einer Seite der reflectirenden Fläche, aber auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes, und der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.*

Beweis. Es sei ab (Fig. 129) ein so kleiner Theil einer Welle, daß derselbe als geradlinig und die beiden Strahlen db und ca daher als parallel angesehen werden dürfen; dieser Theil der Welle lange unter dem Einfallswinkel abn = dbh auf der Oberfläche mn eines neuen Mediums an. Nach dem Huyghens'schen Princip ist der Punkt b nun der Mittelpunkt einer neuen Kugelwelle, die sich sowohl in das neue, wie in das alte Medium fortpflanzt, in dem alten Medium jedenfalls mit der alten Geschwindigkeit, wie die Fortpflanzung der Welle ab selbst geschah und noch weiter geschieht. In derselben Zeit daher, in welcher diese Welle noch weiter von a bis f fortschreitet, hat sich um b eine Elementarkugelwelle gebildet, deren Radius bi = af ist, die Kugelwelle ghi. In dieser Zeit ist aber die Bewegung allmälig auch in allen Punkten zwischen b und f angelangt, und jeder dieser Punkte ist der Mittelpunkt einer neuen Kugelwelle geworden; da aber die Bewegung in jedem folgenden Punkte etwas später anlangt, so müssen die Radien der von ihnen ausgehenden Elementarwellen stetig abnehmen, von bi bis Null, welche letzte nur gedachte Welle den Mittelpunkt f hat. Alle diese Wellen interferiren wegen ihrer stetigen Abnahme zu einer einzigen geradlinigen Welle, die an alle Kugelwellen tangirt. Die Lage dieser tangirenden Welle ist schon aus zwei Elementarwellen zu finden, aus der Welle ghi und der Welle Null um f, indem man einfach von f an die Welle ghi eine Tangente zieht. Also ist fk die durch Reflexion entstehende neue Welle, die reflectirte Welle, und bk ist der Strahl derselben. Der Reflexionswinkel dieser Welle ist bfk = kbh. Aus der Congruenz der beiden Dreiecke abf und kbf folgt leicht, daß $\angle$ abf = $\angle$ kfb, daß also auch $\angle$ dbh = $\angle$ kbh, q.e.d. — Denkt man sich durch die einfallende Kugelwelle vor und hinter der Ebene des Papiers Ebenen gelegt, parallel zu dem Kreise ghi, so entstehen lauter kleinere Parallelkreise; diese werden von der Tangentialebene fk nicht berührt; nur der Kreis ghi hat diese Berührung; folglich liegt auch der zurückgeworfene Strahl in der Ebene dieses Kreises, d. i. in derselben Ebene, in welcher der einfallende Strahl und das Einfallsloth liegen; der einfallende und der reflectirte Strahl liegen mit dem Einfallslothe in einer

Fig. 129.



Ebene, Reflexionsebene genannt. Auch ist leicht ersichtlich, daß die reflectirte Welle mit der einfallenden nicht nur in der Richtung gegen die reflectirende Fläche übereinstimmt, sondern auch in der Gestalt und Größe, und daß nur die Bewegungsrichtung und die Lage die entgegengesetzten sind. Hieraus folgt, daß eine Kugelwelle in derselben Kugelgestalt, mit demselben Radius zurückgeworfen wird, daß aber der Mittelpunkt der zurückschreitenden Welle soweit hinter der Wand liegt, als der Anfangspunkt der einfallenden Welle vor der Wand. — Wellen, die in dem einen Brennpunkte eines elliptischen, mit Quecksilber gefüllten Gefäßes etwa durch Eintröpfeln von Quecksilber erzeugt werden, vereinigen sich in dem anderen Brennpunkte, weil die Ellipse die Eigenschaft hat, daß die von den beiden Brennpunkten an ein Curvenelement gezogenen Leitstrahlen mit diesem Elemente gleiche Winkel bilden. — Werden in dem Brennpunkte eines parabolischen Gefäßes in ähnlicher Weise Wellen erregt, so ziehen dieselben nach der Reflexion geradlinig und senkrecht zur Achse hinaus, weil bei der Parabel ein Leitstrahl und eine Parallele zur Achse mit einem Curvenelemente gleiche Winkel bilden.

Brechung der Wellen. Unter der Brechung der Wellen versteht man die Veränderung, welche die Richtung einer Welle erfährt, wenn dieselbe in ein anderes Medium übergeht. In einem anderen Medium muß nämlich die Dichte eine andere sein, folglich wird auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich verändern gemäß der Veränderung des Ausdrucks $\sqrt{(e:d)}$; und zwar muß die neue Geschwindigkeit c' größer sein als die frühere c, wenn die Dichte des Mediums kleiner geworden ist; hat aber das neue Medium eine größere Dichte, so wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner werden müssen. Folglich haben die in das neue Medium eintretenden Elementarwellen in derselben Zeit größere oder kleinere Durchmesser, als die in das frühere Medium von denselben Molekülen zurückkehrenden Elementarwellen; daher muß die aus der Interferenz der Elementarwellen hervorgehende, in das neue Medium fortschreitende Welle eine andere Richtung haben als in dem früheren Medium. Man nennt den Winkel, den diese von ihrer Richtung abgelenkte oder gebrochene Welle mit der Oberfläche des neuen Mediums macht, oder was dasselbe ist, den der Strahl der gebrochenen Welle mit dem Einfallslothe einschließt, den Brechungswinkel. Für die Brechung gelten folgende Gesetze: 232

1. Der gebrochene Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der gebrochene und der einfallende Strahl liegen auf entgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche und des Einfallslothes, und das Verhältniß der Sinusse des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist constant, nämlich gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in beiden Medien, oder

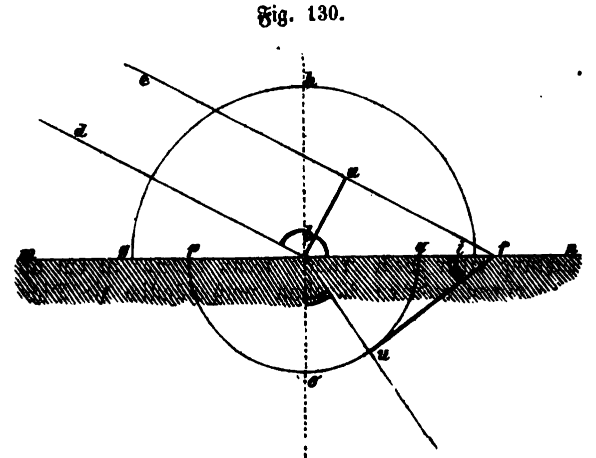
$$\sin\alpha : \sin\beta = c : c' = n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (32)$$

Beweis. In der Zeit, in welcher die Welle ab (Fig. 130) bis f in dem bisherigen Medium fortschreitet, bildet sich um das Molekül eine neue Elementarwelle, sowohl in dem alten Medium als in dem neuen. Der Halbmesser bh dieser Welle ist in dem alten Medium = af; ist das neue Medium dichter als das alte, so muß der Halbmesser bo der hier sich bildenden Elementarwelle poq kleiner sein als bh; und zwar muß das Verhältniß stattfinden $bh : bo = c : c'$. Ebenso bilden sich in dem neuen Medium um alle Moleküle zwischen b und f neue, aber immer kleiner werdende Elementarwellen, da diese Moleküle später zu schwingen anfangen als b; wenn die Bewegung in f anlangt, so ist deren Elementarwelle noch gleich Null. Durch die Interferenz aller dieser Elementarwellen entsteht eine einzige fortschreitende Welle, die an alle Elementarwellen tangirt; die Richtung dieser Welle wird leicht erhalten, wenn man die Tangente der zwei Kugelwellen um b und um f construirt, d. h. wenn man von f an den Kreis poq eine Tangente fu zieht; fu ist also die gebrochene Welle des neuen Mediums, bu der Strahl derselben, $bfu = obu$ der Brechungswinkel, während $abf = dbh$ der Einfallswinkel ist. Nun ist $\sin abf = af : bf$ und $\sin bfu = bu : bf$, folglich $\sin abf : \sin bfu = af : bu$ oder $= bh : bo$, woraus schließlich folgt $\sin abf : \sin bfu = c : c'$ oder $\sin\alpha : \sin\beta = c : c'$.

Dieselbe Ueberlegung wie bei der Reflexion zeigt, daß der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Lothe in einer Ebene liegen.

233 **Beugung oder Inflexion der Wellen.** Unter Beugung der Wellen versteht man die Fortpflanzung der Wellenbewegung um eine Kante herum in den Hinterraum eines Wandrandes, z. B. hinter die zwei Ränder einer Spalte in einer dünnen Wand. Der Raum direct hinter der Spaltöffnung zeigt keine Eigenthümlichkeiten, da sich die Wellenbewegung ohne Hinderniß in denselben fortpflanzen kann; dagegen in dem Raume hinter den Rändern zeigt die Wellenbewegung eigenthümliche Veränderungen, die wieder am deutlichsten durch die Huyghens'schen Elementarwellen zu erklären sind. In diesen Raum pflanzt sich nämlich die Wellenbewegung nicht direct fort, es werden daher auch nicht alle Elementarwellen durch entgegengesetzte Wirkungen aufgehoben, sondern diejenigen Elementarwellen, die von den schwingenden Molekülen am Rande ausgehen, breiten

Fig. 130.



sich kugelförmig hinter den Rand aus. Die Zahl dieser Elementarwellen ist eine beschränkte; daher ist die Wellenbewegung hinter dem Rande wesentlich geschwächt und verschwindet in einiger Entfernung von dem Rande ganz. Diese Entfernung ist um so größer, je stärker die Wellenbewegung ist, je länger die Wellen sind und je langsamer dieselben sich fortbewegen, weil dann Kraft und Zeit für die seitliche Bewegung in größerem Maße vorhanden sind. Diese seitliche geschwächte Bewegung aber geht von wenigen mehr oder minder weit von einander entfernten Mittelpunkten aus; sind die Entfernungen derselben gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen, so müssen sich die Bewegungen gegenseitig verstärken; sind aber die Entfernungen gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen, so heben sich je zwei Bewegungen gegenseitig auf und es muß daher eine Schwächung der Bewegung eintreten. Hinter dem Rande werden also Stellen von verstärkter und geschwächter Wellenbewegung mit einander abwechseln.

234 **Aufg.** 351. Die Schwingungszeit der Wasserwellen soll der Quadratwurzel aus der Wellenlänge proportional sein und für Wellen von 1^m Länge $1\frac{1}{2}$ Sec. betragen; wie groß ist sie für Wellen von 1^{dm} und von 10^m Länge? Aufl.: $\frac{1}{2}$ und $4\frac{1}{2}$ Sec. — Aufg. 352. Zu zeigen, daß auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Wellen der Wurzel aus der Wellenlänge proportional ist. And.: Man benutze Fl. (25) und den Satz in Aufg. 351. — A. 353. Wie groß sind Elongation und Phasengeschwindigkeit nach $\frac{1}{12}$ und nach $\frac{1}{6}$ der Schwingungszeit? Aufl.: Nach Fl. (28) ist $s = r/_2$ und $= r/_2 \sqrt{3}$; sodann $v = u/_2 \sqrt{3}$ und $= u/_2$. — A. 354. Wenn die langsamste Schallschwingung $\frac{1}{8}$ Sec. dauert, und der Schall in 1 Sec. 336^m zurücklegt, wie groß ist dann die Welle jenes Schalles? Aufl.: Nach Fl. (25) ist $l = 42^m$. — A. 355. Wie lang ist die Luftwelle des Tones a, wenn die Schwingungszahl desselben = 440 ist? Aufl.: $l = 76^{cm}$. — A. 356. Wie viel Schwingungen macht das violette Licht, dessen Wellenlänge = $0{,}0004^{mm}$, wenn die Geschwindigkeit des Lichtes = 40000 M. ist. Aufl.: 800 Bill. — A. 357. Welches ist die Wellenlänge dunkler Wärmestrahlen von 200 Bill. Schw. per Sec.? Aufl. $0{,}0016^{mm}$. — A. 358. Zu zeigen, daß der Schall in dichter und dünner Luft gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit besitzt? Aufl.: Benutze Fl. (30) und das Mariotte'sche Gesetz. — A. 359. Wie groß ist die Geschw. des Schalles in Wasserstoff? Aufl.: $336 : \sqrt{0{,}0688} = 1270^m$. — A. 360. Was ist hier gegen die Ansicht einzuwenden, daß der Lichtäther verdünnter Wasserstoff sei? And.: Die Fl. (30), das Mariotte'sche Gesetz, die Geschw. des Schalles in H = 1270^m und die Geschw. des Lichtes = 40000 M. — A. 361. Was müßte stattfinden, wenn jene Ansicht richtig wäre? And.: Die Dichte des H müßte unendlich rascher abnehmen als die Elasticität desselben; vergl. Fl. (30). — A. 362. In welchem Verhältnisse müssen die Elasticität und Dichte des Aethers im Weltraume zu einander stehen, damit die Geschwindigkeit des Lichtes = 40000 M. sei? And.: $\sqrt{(e:d)} = 40000$. — A. 363. Nach welcher Zeit legt eine Wellenbewegung den Weg w zurück? Aufl.: [illegible]

$= w : \sqrt{(e : d)}$. — A. 364. Nach welcher Zeit kommt ein Theilchen, das um $^1/_4$ der Wellenlänge vom ersten entfernt ist, zur Ruhe? Aufl.: Nach Fl. (31) ist $t = {}^1/_2 T$, ${}^2/_2 T$, ${}^3/_2 T$ .... — A. 365. Nach welcher Zeit kommt dieses Theilchen wieder in die ursprüngliche Lage? Aufl.: $t = {}^3/_4 T$, ${}^5/_4 T$ u. s. w., ebenfalls nach Fl. (31). — A. 366. Welche Entfernung müssen die Erregungspunkte zweier violetten Strahlen haben, um sich gegenseitig aufzuheben? Aufl.: $0{,}0002^{mm}$, $0{,}0006^{mm}$, $0{,}001^{mm}$ u. s. w. — A. 367. Welche Entfernung müssen die Tonquellen zweier a besitzen, um sich zu verstärken? Aufl.: 76^{cm}, 152^{cm}, 228^{cm} u. s. w. — A. 368. Welcher Unterschied (Gangunterschied) findet zwischen den Entfernungen der Knoten von den Erregungsstellen zweier entgegengesetzt gerichteten Wellen l statt? Aufl.: ${}^1/_2 l$, ${}^3/_2 l$, ${}^5/_2 l$ .... ${}^1/_2(2n - 1) l$. — A. 369. Wenn ein Erregungspunkt um d von einer Wand absteht, wo liegen die Knoten und wo die Bäuche? Aufl.: $(2d - x) - x = {}^1/_2(2n - 1) l + {}^1/_2 l = {}^1/_2 . 2nl$; hieraus $x = d - {}^1/_2 . nl = d - {}^1/_4 . 2nl$; für die Bäuche $d - {}^1/_4(2n + 1) l$. — A. 370. Wo liegen die Knoten und Bäuche für ein a, das 300^{cm} von der Wand ertönt? Aufl.: Knoten 262^{cm}, 224^{cm}, 182^{cm}, 148^{cm} ....; Bäuche 281^{cm}, 243^{cm} 201^{cm}, 167^{cm} ....

Fünfte Abtheilung.

Die Lehre vom Schalle oder die Akustik.

1. Definition der Akustik.

Begriff und Arten des Schalles. Unter dem Schalle versteht man die Einwirkung schwingender Bewegungen auf das Gehörorgan. 235

Daß wirklich der Schall durch Schwingungen entsteht, lehrt in vielen Fällen eine genauere Betrachtung des schallenden Körpers, sowie die Thatsache, daß schallende Körper verstummen, wenn man durch Festhalten ihre Bewegung hemmt; in anderen Fällen überzeugt man sich durch Versuche; tönende Saiten werfen aufgesetzte Reiter von Papier ab; Sand, der auf tönende Platten gestreut wird, hüpft heftig auf und nieder; läßt man in das Innere einer aufrechten tönenden Glaspfeife an Fäden eine mit Sand bestreute Membran hinab, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung; ebenso zittert Bärlappsamen hin und her, wenn derselbe in eine gläserne Röhre gebracht und diese dann durch Reiben zum Tönen gebracht wird (Kundt 1866). Am schönsten kann man sonst unsichtbare Schwingungen schallender Körper z. B. tönender Stimmgabeln durch Lissajous' Lichtfiguren (1855) sichtbar machen. An einer Stimmgabel ist ein Spiegelchen befestigt, auf welches man in einem dunkeln Raume einen Lichtstrahl fallen läßt; von dem Spiegelchen reflectirt, fällt der Strahl auf einen zweiten Spiegel und wird von diesem auf eine Tafel geworfen. Dort entsteht hierdurch ein Lichtpunkt, wenn die Stimmgabel ruht; tönt dieselbe aber, so vibrirt der Punkt hin und her und bildet dadurch einen Lichtstreifen; dreht man während des Tönens den zweiten Spiegel, so entsteht auf der Tafel eine regelmäßige Welle. — Bringt man in eine Glaspfeife feinsten Kieselstaub, so schwebt derselbe, von der Sonne [illegible]enen, in Form glänzender Punkte in der ruhenden Pfeife; aber sowie dieselbe tönt, [illegible]wandeln sich alle Punkte in glänzende Linien; betrachtet man dieselben in einem Spie[illegible], der um eine den Linien parallele Achse gedreht wird, so erscheint jede Linie als eine [illegible]zende Welle (Mach 1872). Betrachtet man eine tönende Saite durch eine strobosko[illegible] Scheibe, d. i. durch eine undurchsichtige, an ihren Rändern mit Schlitzen versehene, [illegible]ende Scheibe, so kann man bei gehöriger Regulirung der Drehgeschwindigkeit die [illegible]ingungen der Saite deutlich verfolgen (Plateau 1836, Töpler 1866). (Erklärung der [illegible]skopischen Scheiben s. 346.) — Die Schwingungen eines Körpers üben, ähnlich einer [illegible]enden Knallgasblase, Stöße auf die Luft aus, die sich auf das Ohr fortpflanzen. [illegible] dieselben hier den Eindruck des Schalles erzeugen, müssen die Amplitude oder [illegible]ingungsweite und die Schwingungsgeschwindigkeit über gewisse Grenzen hinausgehen, [illegible] die Schwingungszahl nicht unterhalb und oberhalb gewisser Grenzen bleiben. Eine [illegible] Schwingung oder eine geringe Anzahl von Schwingungen ist nur hörbar, wenn [illegible] bei einer Explosion, die Amplitude und die Schwingungsgeschwindigkeit groß sind; [illegible] Pendelschwingungen sind trotz großer Amplitude wegen zu geringer Geschwindigkeit [illegible] Eindruck auf das Gehör, während bei einer leise tönenden Saite die auch für das [illegible]rfste Auge unsichtbaren Schwingungen doch noch hörbar sind, weil sie wegen ihrer

Phasenzeit $= t - t'$, daher der Werth für die Elongation $s = r \sin[2\pi(t - t') : T)] = r \sin[2\pi(t : T - x : cT)]$ oder da $cT = l$ ist, $s = r \sin[2\pi(t : T - x : l)]$ und ebenso $v = u \cos[2\pi[t : T - x : l)]$ .... (31)

226 **Das Zusammentreffen oder die Interferenz mehrerer fortschreitenden Wellenbewegungen** (Fresnel 1830). 1. Die Interferenz mehrerer Wellen von gleicher Fortpflanzungsrichtung, von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Pflanzen sich in derselben Molekülreihe zwei Wellen mit verschiedenen Anfangspunkten fort, so erhält jedes Molekül durch jede der beiden Wellen eine bestimmte Schwingungsweite oder Amplitude; gehen diese Bewegungen nach einer Richtung, so ist die Amplitude des Moleküls gleich der Summe der beiden Amplituden; gehen dieselben nach entgegengesetzter Richtung, so ist der Weg des Moleküls gleich der Differenz der Amplituden, kann also auch gleich Null sein, wenn nämlich die Amplituden einander gleich sind. Das erste wird der Fall sein, wenn die beiden Wellen ganz auf einander fallen, wenn sie also von einem Punkte ausgehen, oder auch von zwei Punkten, die um ganze Wellenlängen von einander entfernt sind, wenn also, wie man sagt, die Phasendifferenz gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen ist; das letzte dagegen muß eintreten, wenn der Berg der einen Welle direct das Thal der anderen bedeckt, wenn also die beiden Wellen von Punkten ausgehen, die um 1/2 Wellenlänge von einander abstehen, oder auch um 3/2, 5/2, 7/2 u. s. w. Wellenlängen, kurz wenn die Phasendifferenz gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen ist. Wenn die Ausgangspunkte zweier gleich langen Wellen von gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Fortpflanzungsrichtung um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, so verstärken die Wellen einander; sind aber die Ausgangspunkte um eine ungrade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt, so schwächen die Wellen einander und heben bei gleichen Amplituden einander auf.

Schärfer erhellt dies aus der mathematischen Betrachtung: Die Elongation eines Theilchens durch eine Welle ist nach Fl. (31) $s = r \sin[2\pi(t : T - x : l)]$; ist nun der Anfangspunkt der zweiten Welle um a von dem der ersten entfernt, so hat dasselbe Theilchen von diesem zweiten Anfangspunkte die Entfernung $x - a$; folglich ist seine Elongation $s_1 = r_1 \sin[2\pi(t : T - (x - a) : l)]$. Da dasselbe Theilchen diese beiden Elongationen erhält, so ist sein Gesammtweg $S = r \sin[2\pi(t : T - x : l) + r_1 \sin[2\pi(t : T - (x - a) : l)]$. Um aus dieser Gleichung die Schwingungsweite ersehen zu können, müssen wir dieselbe auf die Gestalt der Formeln (31) bringen, in welchen r die Amplitude bedeutet. Dies geschieht dadurch, daß wir den letzten Sinus nach der Formel für den Sinus einer Summe entwickeln; hiernach ist nämlich $\sin[2\pi(t : T - x : l + a : l) = \sin[2\pi(t : T - x : l)] \cos[2\pi(a : l)] + \cos[2\pi(t : T - x : l)] \sin 2\pi[(a : l)]$. Setzen wir diesen Werth in S ein und scheiden gemeinschaftliche Factoren aus, so ergibt sich

$S = \sin[2\pi(t : T - x : l)] \{r + r_1 \cos[2\pi(a : l)]\} + \cos[2\pi(t : T - x : l)] r_1 \sin[2\pi(a : l)]$.

Bestimmen wir nun zwei Größen R und D so, daß

$R \cos[2\pi(D : l)] = r + r_1 \cos[2\pi(a : l)]$ und $R \sin[2\pi(D : l)] = r_1 \sin[2\pi(a : l)]$

und setzen wir diese beiden Werthe in den Werth für S, so ergibt sich

$S = R \sin[2\pi(t : T - x : l)] \cos[2\pi(D : l) + R \cos[2\pi(t : T - x : l)] \sin[2\pi(D : l)]$ oder $S = R \sin[2\pi(t : T - (x - D) : l)]$. Jetzt ist die neue Elongation auf der allgemeinen Elongationenform; folglich ist R die neue Amplitude. Wie groß dieselbe ist, ergibt sich aus den zwei Bestimmungsgleichungen für R und D, wenn wir diese quadriren und dann addiren:

$R^2 \cos^2[2\pi(D : l)] = r^2 + 2rr_1 \cos[2\pi(a : l)] + r_1^2 \cos^2[2\pi(a : l)]$; hierzu

$R^2 \sin^2[2\pi(D : l)] = \quad r_1^2 \sin^2[2\pi(a : l)]$, ergibt

$R^2 = r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos[2\pi(a : l)]$, woraus $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos[2\pi(a : l)]}$, ein Ausdruck, der uns durch die Uebereinstimmung mit der Fl. (14) für das Parallelogramm der Kräfte zeigt, daß die Zusammensetzung der Schwingungen ganz nach den Regeln der Mechanik geschieht. Ist nun die Phasendifferenz $a = nl$, d. i. gleich einer ganzen Anzahl von Wellenlängen, so ist $\cos 2\pi(a : l) = \cos 2n\pi = 1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 + 2rr_1)} = r + r_1$. Ist dagegen a gleich einer ungeraden Anzahl von halben

Wellenlängen, also $a = (2n + 1) . \frac{1}{2} l$, so ist $\cos [2\pi (a : l)] = \cos [(2n + 1) \pi] = -1$, also ist $R = \sqrt{(r^2 + r_1^2 - 2rr_1)} = r - r_1$; wenn $r = r_1$, so ist $R = o$; hiermit sind obige Sätze bewiesen.

Diese sehr wichtigen Erscheinungen lassen sich mit Fessels Wellenmaschine zeigen; auch kann man sie in Wasser oder in Quecksilber hervorrufen, wenn man zwei Wellensysteme erregt; wo Berg und Berg zusammentreffen, zeigt sich ein höherer Berg; wo Thal und Thal auf einander kommen, ein tieferes Thal, wo aber Berg und Thal zusammentreffen, erscheint die Bewegung stark vermindert oder ganz aufgehoben. Sonst schreitet ein Wellensystem ungehindert durch das andere fort.

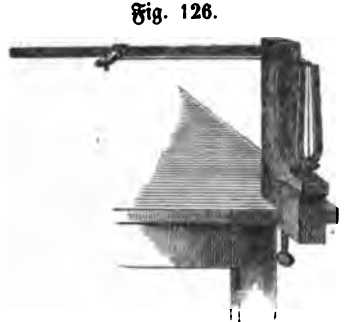
2. Die Interferenz mehrerer Wellen von entgegengesetzter Fortpflanzungsrichtung, aber gleicher Schwingungsrichtung und gleicher Länge. Zwei Wellen, deren Anfangspunkte um eine Wellenlänge von einander abstehen, und die gleiche Längen und Amplituden haben, liegen nach einer Schwingungszeit so auf einander, daß Berg und Thal sich gegenseitig aufheben und decken, alle Theilchen sind gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, gehen also auch gleichzeitig aus derselben heraus. Nach weiterem Verlauf von $\frac{1}{4}$ Schwingungszeit werden die Thäler beider Wellen in der Mitte zwischen den zwei Anfangspunkten stehen und ein doppelt so tiefes Thal bilden, während zu beiden Seiten dieses Thales halbe Berge auf einander treffen und dadurch halbe Berge von doppelter Höhe bilden. Die Punkte zwischen diesen Bergen und dem Thale sind in der ursprünglichen Lage in Ruhe; sie mußten auch bisher in Ruhe sein, denn so viel sie durch das Thal der einen Welle erniedrigt wurden, ebenso viel mußten sie durch den ebenso hohen Berg der andern Welle erhöht werden. Dies geht in gleicher Weise in dem folgenden Viertel der Schwingungszeit fort, und an dem Schlusse dieses Viertels, wo wieder Berge und Thäler über einander stehen, sind nicht blos diese zwei Punkte, sondern alle in der ursprünglichen Lage. Nach dem dritten Viertel der zweiten Schwingungszeit sind die zwei Berge in die Mitte gelangt und bilden einen höheren Berg, während beiderseits halbe tiefere Thäler stehen, und wieder dieselben Punkte, die um $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge von den Anfangspunkten abstehen, in der ursprünglichen Lage geblieben sind; nach vollem Verlaufe der zweiten Schwingungszeit ist wieder Alles in der ursprünglichen Lage. Da alle Theilchen immer gleichzeitig in der ursprünglichen Lage, also auch gleichzeitig in den äußersten Lagen sind, so besteht die beschriebene Erscheinung aus einer ganzen und zwei halben stehenden Wellen, welche durch ruhende Punkte in $\frac{1}{4}$ und $\frac{3}{4}$ der Wellenlänge von einander getrennt sind. Diese ruhenden Punkte zwischen stehenden Wellen werden **Schwingungsknoten**, die am weitesten ausschreitenden Punkte **Schwingungsbäuche** genannt. Die Schwingungsknoten sind nicht etwa als Punkte anzusehen, die von den zwei Wellenbewegungen ganz unberührt bleiben; sie sind vielmehr die Durchgangspunkte zweier Bewegungen, welche an diesen Punkten gleich und entgegengesetzt sind; die Knoten erhalten jeden Augenblick zwei Bewegungen und pflanzen sie nach beiden Seiten hin fort, bleiben aber selbst in Ruhe oder wenigstens in stets wechselnder unendlich kleiner Bewegung nach beiden Seiten, weil jede Geschwindigkeit nach der einen Seite hin sofort durch eine nach der entgegengesetzten Seite hin aufgehoben wird. Ein Schwingungsknoten ist von einem Schwingungsbauche um eine halbe stehende Wellenlänge oder um ein Viertel der Länge der fortschreitenden Wellen entfernt, durch deren Interferenz sich die stehenden Wellen bilden. — **Durch Interferenz entgegengesetzt fortschreitender Wellen entstehen stehende Wellen von der halben Länge der fortschreitenden Wellen; je zwei nebeneinander liegende stehende Wellen sind in entgegengesetzten Phasen und durch Schwingungsknoten getrennt.** Allgemeiner folgt dies aus der mathematischen Betrachtung.

227

Die Elongation eines Theilchens der ersten Welle ist nach Formel (31) $s = r \sin [(2\pi (t : T - x : l)]$. Ist nun der Abstand der beiden Anfangspunkte $= a$, so ist der Abstand des Theilchens von dem 2. Anfangspunkte $= a - x$; also ist die Elongation des Theilchens durch die 2. Welle $= r \sin [2\pi (t : T - (a - x) : l)]$; die Gesammtelongation ist daher $S = r \sin [2\pi (t : T - x : l)] + r \sin [2\pi (t : T - (a - x) : l)]$. Benutzen wir nun die bekannte trigonometrische Formel für die Summe zweier Sinusse $\sin a + \sin b = 2 \sin {}^1/_2 (a + b) \cos {}^1/_2 (a - b)$, so ergibt sich $S = 2r \sin [2\pi (t : T - a : 2l)] \cos [\pi (a - 2x) : l)]$ oder $S = 2r \cos [\pi (2x - a) : l)] \sin [2\pi (t : T - a : 2l)]$. Dieser Ausdruck ist nun auf der allgemeinen Elongationsform. Der erste Theil desselben $2r \cos [\pi (2x - a) : l]$ gibt die Amplitude an. Dieselbe ist gleich Null, wenn $\cos [\pi (2x - a) : l]$ gleich Null ist, d. h. wenn (für $a = l$) $x = {}^1/_4 l, {}^3/_4 l, {}^5/_4 l$ u. s. w. ist; an diesen Stellen sind also die Punkte in Ruhe, hier sind Schwingungsknoten. Ist $x < {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus positiv, also auch die Amplitude positiv; ist $x > {}^3/_4 l$, so ist der Cosinus negativ, also auch die Amplitude negativ; zu beiden Seiten eines Knotens finden sich entgegengesetzte Phasen; der zweite Theil unseres Ausdruckes für die Gesammtelongation gibt die Abstände der Theilchen von der Gleichgewichtslage an; da in demselben x gar nicht vorkommt, so sind diese Abstände von x unabhängig; die Theilchen durchlaufen alle gleichzeitig die Gleichgewichtslage, erreichen also auch gleichzeitig ihre äußersten Lagen, kurz es bilden sich stehende Wellen.

Auch diese Erscheinungen sind mit Fessels Wellenmaschine zu zeigen; mit einiger Uebung lassen sie sich auch an einem Seile oder an einem mit Sand gefüllten Kautschukschlauche hervorrufen, der an einem Ende befestigt und an dem anderen Ende lose mit der Hand hin- und herbewegt wird. Es werden alsdann die an dem Schlauche hinlaufenden Wellen an dem festen Ende zurückgeworfen und bilden durch Interferenz mit neu erregten Wellen Schwingungsknoten und stehende Wellen. Auch durch Interferenz fortschreitender Wasserwellen mit reflectirten Wellen lassen sich stehende Wellen erzeugen. Indessen sind hier wie bei allen durch Reflexion erzeugten stehenden Wellen, die letzten Knoten nicht halb soweit von den Enden entfernt als von den nächsten Knoten, sondern ihre Abstände von den Endpunkten sind ebenso groß, wie ihre Abstände von einander; es rührt dies davon her, daß, wie sich bei der Reflexion (231.) ergeben wird, die reflectirte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, wodurch sich die Knoten um ¼ dieser Länge verschieben. Am schärfsten und mannichfaltigsten sind diese Erscheinungen an Meldes (1860) Stimmgabelapparat (Fig. 126) hervorzurufen. Mit einer Stimmgabel ist ein Faden verbunden, der mit dem Stifte eines auf einem Lineale verschiebbaren Schlittens verknüpft ist und daher nach Belieben länger und kürzer gespannt werden kann. Wenn nun die Stimmgabel zum Tönen, d. i. zum Schwingen gebracht wird, so pflanzen sich die Schwingungen auf den Faden fort, werden an dem Stifte reflectirt und bilden mit neu ankommenden Schwingungen stehende Wellen; diese entstehen aber nur dann, wenn die Fadenlänge ein Ein- oder Vielfaches von der halben Länge der Welle ist, welche die Gabel in dem Faden hervorruft; man kann diese Bedingung durch Spannen und Verlängern des Fadens erfüllen. Ist der Faden an den beiden Enden mit Stimmgabeln verbunden, so erhält man die stehenden Wellen ohne das Hilfsmittel der Reflexion. — Befestigt man nach Matthiessen (1868) an die beiden Zinken einer Stimmgabel dünne Stifte und läßt deren Spitzen in Flüssigkeit tauchen, während die Stimmgabel tönt, so entstehen kleine Kräuselwellen, die zwischen den Spitzen zu stehenden Wellen interferiren; die Ursache dieser Wellen ist die Elasticität der Flüssigkeitshaut; daher folgen sie den zuletzt gefundenen Gesetzen, nicht aber den Gesetzen der durch die Schwere erzeugten großen Wasserwellen.

Fig. 126.



228 3. Interferenz von Wellen verschiedener Schwingungsrichtung. Wie in einer Reihe von Molekülen sich nach einer oder nach entgegengesetzter Richtung solche Schwingungen fortpflanzen können, die nach einer Richtung vor sich gehen, so können die Schwingungsrichtungen auch einen Winkel mit einander machen. Hierdurch erfährt jedes Molekül eine Wirkung durch zwei nach verschiedenen Richtungen gehende Kräfte; welchen Weg es dabei einschlägt, ist nach dem Satze von dem Parallelogramm der Kräfte zu berechnen. Vollzieht man eine solche Rechnung, so ergibt sich aus den Lehren der analytischen Geometrie, daß allgemein gefaßt der

Weg des Moleküls die Form einer Ellipse haben muß, welche in eine gerade Linie übergeht, wenn die Phasendifferenz = 0 ist, und in einen Kreis, wenn die Schwingungsrichtungen auf einander senkrecht stehen, und die Amplituden einander gleich sind.

Die Vereinigung zweier Schwingungsbewegungen läßt sich beobachten an Meldes (1862) Universalkaleidophon (καλός = schön, εἶδος = Gestalt, φωνή = Ton). Dasselbe besteht aus einer festgeklemmten Lamelle, die eine zweite Klemme zur Aufnahme einer zweiten Lamelle mit einem glänzenden Knopfe trägt. Setzt man die beiden Lamellen gleichzeitig in Schwingungen, so entstehen allerlei leuchtende Schwingungscurven.

Wie sich zwei Schwingungsbewegungen zu einer neuen componiren, so kann und muß auch die Vereinigung von mehr als zwei solcher Bewegungen stattfinden, wenn diese sich in derselben Molekülreihe fortpflanzen; die Vereinigung geschieht hierbei immer nach dem Parallelogramm der Kräfte. Hierdurch kann die Bahnform der schwingenden Theilchen sich noch weiter von der geraden Linie entfernen als in der elliptischen oder kreisförmigen Bahn; alle nur denkbaren geschlossenen Curven mit unzähligen Einbiegungen, Zacken und anderen kleineren Veränderungen können vorkommen. Kann ein Medium Wellen von den verschiedensten Längen annehmen, so können auch die verschiedensten Wellen interferirend auf einander wirken, jedoch nur so weit, als sie sich auf dieselben Theile des Mediums erstrecken; treten sie aus dem gemeinschaftlichen Theile heraus, so pflanzen sie sich, ungeändert durch die vorhergegangene Interferenz, in derselben Weise weiter fort, als ob keine Interferenz stattgefunden hätte. Man nennt diese ungestörte Fortpflanzung verschiedener Wellen durch ein und dasselbe Medium die Superposition kleinster Schwingungen; sie gilt wirklich nur für kleinste Schwingungen; bei endlicher Amplitude dagegen entstehen secundäre Wellenbewegungen. Noch beschränkter ist die Erscheinung in einem Medium, das für eine bestimmte Schwingungsbewegung abgestimmt ist; ein solches vermag nur Wellen von der Länge dieser Bewegung auszuführen und außerdem noch Wellen von 2, 3, 4 ...fach kürzerer Länge, weil alle anderen Wellen unregelmäßig reflectirt und so zersplittert werden. Jene Hauptwelle nun kann und muß mit diesen Wellen zu einer neuen verwickelten, aber doch regelmäßigen Schwingungsbewegung interferiren, weil in diesem Falle auf eine längere Welle mehrere kürzere immer an denselben Punkten treffen und nur dann die sämmtlichen Combinationswellen einander gleich sind. Sowie aber nach dem Parallelogramm der Kräfte eine zusammengesetzte Bewegung in ihre Componenten zerlegt werden kann, so kann auch jede noch so verwickelte Schwingungsbewegung der Moleküle wieder in die componirenden Theilbewegungen, in einfache, geradlinige, pendelartige Schwingungen zerlegt werden; und zwar kann ebenso, wie aus mehreren einfachen Wellen eine ganze bestimmte Interferenzwelle hervorgeht, eine bestimmte zusammengesetzte Schwingungsbewegung nur auf eine Art in einfache pendelartige Schwingungen zerlegt werden, deren Schwingungszeiten ganze Vielfache von einander sind (Fouriers Gesetz 1827). Eine solche Zerlegung muß stattfinden, sowie die Schwingungsbewegung auf Gegenstände trifft, die nur pendelartige Schwingungen vollziehen können, ganz in derselben Weise, wie eine schief gerichtete Kraft sich von selbst in Componenten zerlegt, wenn sie auf eine Fläche wirkt, die sich nur senkrecht zu ihrer eigenen Richtung bewegen kann.

Ausbreitung der Wellen. Wie sich eine Wellenbewegung ausbreitet, hängt von der Beschaffenheit des Stoffes ab, in welchem die Bewegung vor sich geht; man nennt denselben das Fortpflanzungsmittel oder das Medium; die Richtung, in welcher sich die Bewegung fortpflanzt, nennt man Strahl oder Radius. Sind auf einem Radius die Dichte und die Elasticität des Mediums unveränderlich, so nennt man das Medium homogen, im entgegengesetzten Falle heterogen; sind die Dichte und die Elasticität in den Richtungen aller nur denkbaren Radien dieselben oder wenigstens in demselben Verhältnisse zu einander, so wird das Medium ein isotropes genannt, anderenfalls ein anisotropes. 229

Von einem Punkte eines isotropen Mediums aus pflanzt sich eine Wellenbewegung nach allen Richtungen fort; denn dieser Punkt ist der Anfangspunkt einer unendlichen Anzahl von Molekülreihen, in welchen allen durch die Bewegung des ersten Punktes eine gleiche Störung des Gleichgewichtes erzeugt wird. — In allen diesen Richtungen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieselbe, weil der dieselbe bestimmende Ausdruck $\sqrt{(e:d)}$ unverändert bleibt. — Die Wellenbewegung pflanzt sich in immer größer werdenden Kugelwellen fort; denn z. B. nach einer Schwing-

ungszeit ist auf allen Molekülreihen die Bewegung um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge fortgerückt; es fangen daher alle Theilchen auf der Oberfläche einer Kugel, deren Radius gleich der Wellenlänge ist, gleichzeitig ihre Bewegung an, vollenden sie in gleichen Zeiten und sind daher immer in gleichen Phasen. Dauert die Erregung fort, so beginnen diese Theilchen nach zwei Schwingungszeiten neue Schwingungen; dasselbe thun dann aber auch alle Theilchen einer zweiten Kugeloberfläche, die von der ersten um eine Wellenlänge concentrisch absteht, weil sich die erste Bewegung während der zweiten Schwingungszeit um gleichviel, nämlich um eine Wellenlänge, von der ersten Kugelfläche aus auf allen Molekülreihen fortgepflanzt hat; es sind daher die Theilchen dieser zwei Kugelflächen in gleichen Phasen. — Eine Fortsetzung dieser einfachen Betrachtung ergibt, daß alle Theilchen solcher um den Anfangspunkt concentrischen Kugelflächen, die um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen, in gleichen Phasen begriffen sind, daß aber die Moleküle derjenigen Kugelflächen sich in entgegengesetzten Phasen befinden, die um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind. — Die Richtungen der Fortpflanzung stehen auf der Wellenoberfläche senkrecht, weil diese Richtungen die Radien von Kugeln sind, und weil die Radien auf den Elementen von Kugelflächen senkrecht stehen. Zieht man nur Flächenelemente in Betracht, so darf man die Wellenoberfläche als eben, einen Schnitt derselben als gerade Linie ansehen; dasselbe darf auch geschehen, wenn der Anfangspunkt sehr weit entfernt ist, z. B. so weit wie die Sonne und die Sterne. — Die Richtungen der Fortpflanzung sind gerade, vom Anfangspunkte ausgehende Linien; denn jede radiale Richtung an einer beliebig großen Kugelwelle ist immer die Verlängerung einer radialen Richtung einer um sehr wenig kleineren Kugelwelle; verfolgt man auf diese Weise die radialen Richtungen auf immer kleinere Kugelwellen, so gelangt man endlich in gerader Richtung zu dem Anfangspunkte.

Die Stärke oder Intensität der Schwingungsbewegung steht in umgekehrtem Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung von dem Anfangspunkte. Denn die Kugelwellen, auf welche sich die anfängliche Bewegung fortpflanzt, werden immer größer und verhalten sich nach einem bekannten geometrischen Satze wie die Quadrate ihrer Radien; da sich nun dieselbe lebendige Kraft, mit welcher der Anfangspunkt sich bewegt, von einer dieser Kugelwellen auf die andere verbreitet, so kann ein und dasselbe Flächenstück von zweien solcher Kugelflächen nicht einen gleichen Betrag von lebendiger Kraft empfangen, sondern dieser Betrag muß in demselben Maße kleiner werden, als die Kugelflächen wachsen. Die lebendige Kraft der Bewegung bestimmt aber die Intensität derselben; folglich steht die Intensität der Bewegung im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Radien der Kugelwellen.

230 **Das Huyghens'sche Princip** (1690). Statt sich vorzustellen, die Schwingungsbewegung eines Moleküls habe sich in einer am Anfangspunkte beginnenden Molekülreihe von Theilchen zu Theilchen bis zu dem Molekül fortgepflanzt, kann man sich nach Huyghens die Ausbreitung der Wellenbewegung auch so denken, daß jedes bewegte Theilchen den Mittelpunkt einer Kugelwelle bilde, und daß demnach die Bewegung eines Moleküls das Resultat der Interferenz unendlich vieler Kugelwellen sei.

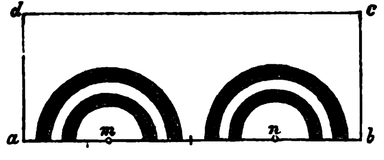
Diese Vorstellung führt zu denselben, so eben betrachteten, Folgerungen wie die erste Vorstellung; sie ist berechtigt, weil ja jedes schwingende Theilchen eine Kugelwelle bildet. Durch diese Vorstellung ergibt sich zunächst, daß von einer Kugelfläche aus sich in einer Schwingungszeit eine neue concentrische Kugelwellenfläche von gleicher Phase bildet; denn sind alle Theilchen der ersten Kugelfläche die Mittelpunkte von neuen Kugelwellen, so entstehen rings um die erste Kugelfläche unendlich viele eng neben und in einander liegende Halbkugelwellen von gleichen Radien, weil die Dichte und Elasticität des Mediums überall

dieselben sind. Die Oberflächentheilchen dieser Wellen sind alle in gleichen Phasen mit einander und mit der ersten Kugelfläche; folglich sind auch die äußersten unendlich enge neben einander liegenden Theilchen aller dieser Kugelwellen gleich weit von der ersten Kugelfläche entfernt und in gleicher Phase, bilden also um diese eine zweite concentrische Kugelwelle von gleicher Phase. Ein Blick auf Fig. 127 macht dies vollständig klar. — Wollte man nun gegen diese Vorstellung einwenden, daß durch dieselbe jedes Molekül von unzähligen Anfangspunkten bewegt erscheine und daß demnach die Bewegung des Moleküls unendlich groß sein müsse, so ist dagegen Folgendes zu bemerken: In dem Momente, wo sich die Bewegung des Anfangspunktes in einer Molekülreihe um eine Wellenlänge fortgepflanzt hat, beginnt das letzte Molekül seine Bewegung; jetzt aber gibt es zu jedem Molekül der Reihe immer ein anderes, das sich in entgegengesetzter Phase befindet, weil es von dem ersteren um eine halbe Wellenlänge absteht; die Einwirkungen von je zwei solcher Moleküle auf das letzte heben einander auf. Ganz dasselbe gilt auch von allen anderen ringsum liegenden Theilchen, die ihre Bewegung von dem ersten empfangen haben. Also ist die Wirkung auf das letzte Molekül gerade so, als ob nur das erste sich bewegt hätte. — Diese Vorstellung von Huyghens wird uns manche der folgenden Betrachtungen erleichtern, weßhalb sie besonders zu beachten ist. Experimentell anschaulich machen läßt sie sich durch eine Vorrichtung von Mach (1868): Auf den Mantel a b c d (Fig. 128) eines Cylinders sind Kreise um m und n gezeichnet, welche Elementarkugelwellen vorstellen sollen. Wird nun der Cylinder in Rotation gesetzt, so sieht man zu a b parallele helle und dunkle Streifen, welche uns zeigen, daß die Interferenz der Elementarwellen größere, in diesem Falle, geradlinige Wellen erzeugt.

Fig. 127.



Fig. 128.



Reflexion der Wellenbewegung. Unter der Reflexion der Wellen versteht man die Erscheinung, daß Wellen an der Oberfläche eines neuen Mediums in das frühere Medium zurückkehren. Nach dem Huyghens'schen Princip wirkt nämlich jedes schwingende Molekül nicht blos vorwärts, in der Richtung der Fortpflanzung der Wellenbewegung, sondern auch rückwärts, da jedes Molekül der Mittelpunkt einer Elementarkugelwelle ist; indessen wird in einem isotropen Medium hierdurch keine rückwärts schreitende Wellenbewegung erzeugt; denn zu jedem Molekül läßt sich immer ein solches finden, das um eine halbe Wellenlänge von demselben entfernt und daher in entgegengesetzter Phase ist; hierdurch heben sich die Rückwirkungen dieser zwei Moleküle auf, weil die von denselben erzeugten Bewegungen vollkommen gleich und entgegengesetzt sind. Ganz anders aber gestaltet sich die Rückwirkung, wenn das Medium eine Veränderung erfährt, dichter oder weniger dicht wird; dann wird jedenfalls die Bewegung der Theilchen der ersten Schicht des neuen Mediums eine andere sein, als diejenige der rückwärts liegenden Theilchen des alten Mediums; es können daher auch die rückschreitenden Theile der Elementarkugelwellen des neuen Mediums nicht mehr in ihrer Wirkung aufgehoben werden, ein größerer oder kleinerer Theil der an dem neuen Medium anlangenden Schwingungsbewegungen muß in das alte Medium zurückkehren, während der übrige Theil sich in veränderter Weise in das neue Medium fortpflanzt. Wenn also eine Wellenbewegung auf ein anderes Medium trifft, so wird sie von demselben theilweise zurückgeworfen oder reflectirt, theilweise, aber in veränderter Art, aufgenommen; jeder von diesen beiden Theilen kann je nach der veränderten Beschaffenheit des Mediums, das eine mal sehr groß, das andere mal verschwindend klein sein, so daß auch eine nahezu vollständige Reflexion denkbar ist, ebenso wie eine nahezu vollständige Aufnahme, welcher letztere Fall bei sehr geringer Verschiedenheit der beiden Medien eintreten wird.

231

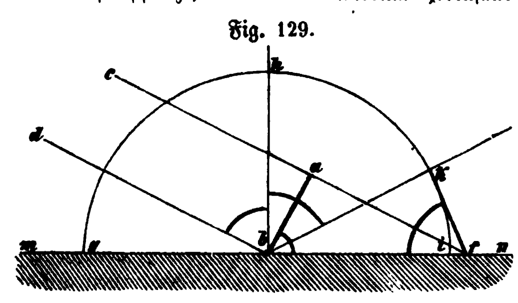
Ist das neue Medium dichter als das alte, so ist die zurückgeworfene Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben. Denn ein gegen die Wand stoßendes Theilchen wird zurückgeworfen, ein z. B. aufwärts gehendes Theilchen wird durch die stärkere Anziehung der dichteren Moleküle abwärts gezogen, kurz jedes Theilchen gelangt in die entgegengesetzte Phase. Langt daher die Welle als Thal an, so kehrt sie als Berg zurück, und umgekehrt; die reflectirte Welle ist gegen die einfallende um 1/2 Wellenlänge verschoben. — Besonders wichtig ist die Richtung der zurückgeworfenen Welle; es ist gebräuchlich, hierbei die Richtung des bekanntlich auf der Wellenfläche senkrecht stehenden Strahles ins Auge zu fassen, und statt des Winkels, den die Welle mit der reflectirenden Wand einschließt, den gleichen Winkel zu betrachten, den der Strahl mit einem an der Berührungsstelle auf der Fläche errichteten Lothe bildet. Man nennt den Winkel, welchen der Strahl der ursprünglichen Welle mit dem Lothe einschließt, den Einfallswinkel, und den Winkel, den der Strahl der zurückgeworfenen Welle mit dem Lothe einschließt, den Reflexionswinkel. Für die Reflexion gelten folgende zwei Gesetze:

1. Der reflectirte Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der reflectirte und der einfallende Strahl liegen auf einer Seite der reflectirenden Fläche, aber auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes, und der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

Beweis. Es sei ab (Fig. 129) ein so kleiner Theil einer Welle, daß derselbe als geradlinig und die beiden Strahlen db und ca daher als parallel angesehen werden dürfen; dieser Theil der Welle lange unter dem Einfallswinkel abn = dbh auf der Oberfläche mn eines neuen Mediums an. Nach dem Huyghens'schen Princip ist der Punkt b nun der Mittelpunkt einer neuen Kugelwelle, die sich sowohl in das neue, wie in das alte Medium fortpflanzt, in dem alten Medium jedenfalls mit der alten Geschwindigkeit, wie die Fortpflanzung der Welle ab selbst geschah und noch weiter geschieht. In derselben Zeit daher, in welcher diese Welle noch weiter von a bis f fortschreitet, hat sich um b eine Elementarkugelwelle gebildet, deren Radius bi = af ist, die Kugelwelle ghi. Zu dieser Zeit ist aber die Bewegung allmälig auch in allen Punkten zwischen b und f angelangt, und jeder dieser Punkte ist der Mittelpunkt einer neuen Kugelwelle geworden; da aber die Bewegung in jedem folgenden Punkte etwas später anlangt, so müssen die Radien der von ihnen ausgehenden Elementarwellen stetig abnehmen, von bi bis Null, welche letzte nur gedachte Welle den Mittelpunkt f hat. Alle diese Wellen interferiren wegen ihrer stetigen Abnahme zu einer einzigen geradlinigen Welle, die an alle Kugelwellen tangirt. Die Lage dieser tangirenden Welle ist schon aus zwei Elementarwellen zu finden, aus der Welle ghi und der Welle Null um f, indem man einfach von f an die Welle ghi eine Tangente zieht. Also ist fk die durch Reflexion entstehende neue Welle, die reflectirte Welle, und bk ist der Strahl derselben. Der Reflexionswinkel dieser Welle ist bfk = kbh. Aus der Congruenz der beiden Dreiecke abf und kbf folgt leicht, daß ∠abf = ∠kfb, daß also auch ∠dbh = ∠kbh, q. e. d. — Denkt man sich durch die einfallende Kugelwelle vor und hinter der Ebene des Papiers Ebenen gelegt, parallel zu dem Kreise ghi, so entstehen lauter kleinere Parallelkreise; diese werden von der Tangentialebene fk nicht berührt; nur der Kreis ghi hat diese Berührung; folglich liegt auch der zurückgeworfene Strahl in der Ebene dieses Kreises, d. i. in derselben Ebene, in welcher der einfallende Strahl und das Einfallsloth liegen; der einfallende und der reflectirte Strahl liegen mit dem Einfallslothe in einer

Fig. 129.



Ebene, Reflexionsebene genannt. Auch ist leicht ersichtlich, daß die reflectirte Welle mit der einfallenden nicht nur in der Richtung gegen die reflectirende Fläche übereinstimmt, sondern auch in der Gestalt und Größe, und daß nur die Bewegungsrichtung und die Lage die entgegengesetzten sind. Hieraus folgt, daß eine Kugelwelle in derselben Kugelgestalt, mit demselben Radius zurückgeworfen wird, daß aber der Mittelpunkt der zurückschreitenden Welle soweit hinter der Wand liegt, als der Anfangspunkt der einfallenden Welle vor der Wand. — Wellen, die in dem einen Brennpunkte eines elliptischen, mit Quecksilber gefüllten Gefäßes etwa durch Eintröpfeln von Quecksilber erzeugt werden, vereinigen sich in dem anderen Brennpunkte, weil die Ellipse die Eigenschaft hat, daß die von den beiden Brennpunkten an ein Curvenelement gezogenen Leitstrahlen mit diesem Elemente gleiche Winkel bilden. — Werden in dem Brennpunkte eines parabolischen Gefäßes in ähnlicher Weise Wellen erregt, so ziehen dieselben nach der Reflexion geradlinig und senkrecht zur Achse hinaus, weil bei der Parabel ein Leitstrahl und eine Parallele zur Achse mit einem Curvenelemente gleiche Winkel bilden.

Brechung der Wellen. Unter der Brechung der Wellen versteht man die Veränderung, welche die Richtung einer Welle erfährt, wenn dieselbe in ein anderes Medium übergeht. In einem anderen Medium muß nämlich die Dichte eine andere sein, folglich wird auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit sich verändern gemäß der Veränderung des Ausdrucks $\sqrt{(e:d)}$; und zwar muß die neue Geschwindigkeit c' größer sein als die frühere c, wenn die Dichte des Mediums kleiner geworden ist; hat aber das neue Medium eine größere Dichte, so wird die Fortpflanzungsgeschwindigkeit kleiner werden müssen. Folglich haben die in das neue Medium eintretenden Elementarwellen in derselben Zeit größere oder kleinere Durchmesser, als die in das frühere Medium von denselben Molekülen zurückkehrenden Elementarwellen; daher muß die aus der Interferenz der Elementarwellen hervorgehende, in das neue Medium fortschreitende Welle eine andere Richtung haben als in dem früheren Medium. Man nennt den Winkel, den diese von ihrer Richtung abgelenkte oder gebrochene Welle mit der Oberfläche des neuen Mediums macht, oder was dasselbe ist, den der Strahl der gebrochenen Welle mit dem Einfallslothe einschließt, den Brechungswinkel. Für die Brechung gelten folgende Gesetze: 232

1. Der gebrochene Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der gebrochene und der einfallende Strahl liegen auf ntgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche und des Einfallslothes, und das Verhältniß der Sinusse des Einfallswinkels und des Brechungswinkels ist constant, nämlich gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in beiden Medien, oder

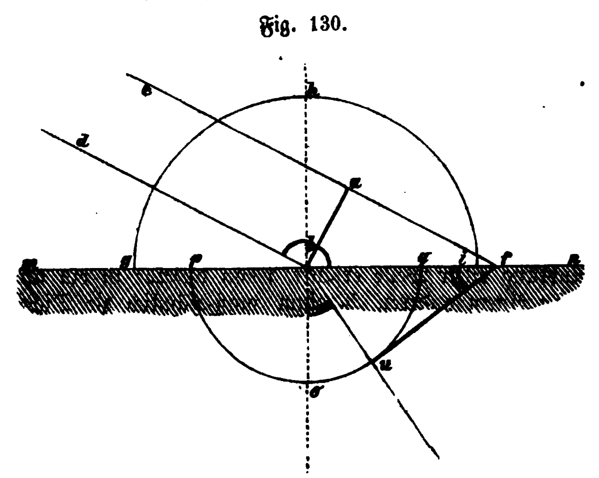
$$\sin\alpha : \sin\beta = c : c' = n \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (32)$$

Beweis. In der Zeit, in welcher die Welle ab (Fig. 130) bis f in dem bisherigen Medium fortschreitet, bildet sich um das Molekül eine neue Elementarwelle, sowohl in dem ...en Medium als in dem neuen. Der Halbmesser bh dieser Welle ist in dem alten Me...um $= af$; ist das neue Medium dichter als das alte, so muß der Halbmesser bo der ...er sich bildenden Elementarwelle poq kleiner sein als bh; und zwar muß das Verhält...ß stattfinden $bh : bo = c : c'$. Ebenso bilden sich in dem neuen Medium um alle Mo...le zwischen b und f neue, aber immer kleiner werdende Elementarwellen, da diese ...üle später zu schwingen anfangen als b; wenn die Bewegung in f anlangt, so ist ...n Elementarwelle noch gleich Null. Durch die Interferenz aller dieser Elementarwellen ...eht eine einzige fortschreitende Welle, die an alle Elementarwellen tangirt; die Richtung ...er Welle wird leicht erhalten, wenn man die Tangente der zwei Kugelwellen um b und ... f construirt, d. h. wenn man von f an den Kreis poq eine Tangente fu zieht; fu ist ... die gebrochene Welle des neuen Mediums, bu der Strahl derselben, $bfu = obu$ der ...ungswinkel, während $abf = dbh$ der Einfallswinkel ist. Nun ist $\sin abf = af : bf$ ... $\sin bfu = bu : bf$, folglich $\sin abf : \sin bfu = af : bu$ oder $= bh : bo$, woraus schließ... folgt $\sin abf : \sin bfu = c : c'$ oder $\sin\alpha : \sin\beta = c : c'$.

Dieselbe Ueberlegung wie bei der Reflexion zeigt, daß der einfallende und der ge...chene Strahl mit dem Lothe in einer Ebene liegen.

233 **Beugung oder Inflexion der Wellen.** Unter Beugung der Wellen versteht man die Fortpflanzung der Wellenbewegung um eine Kante herum in den Hinterraum eines Wandrandes, z. B. hinter die zwei Ränder einer Spalte in einer dünnen Wand. Der Raum direct hinter der Spaltöffnung zeigt keine Eigenthümlichkeiten, da sich die Wellenbewegung ohne Hinderniß in denselben fortpflanzen kann; dagegen in dem Raume hinter den Rändern zeigt die Wellenbewegung eigenthümliche Veränderungen, die wieder am deutlichsten durch die Huyghens'schen Elementarwellen zu erklären sind. In diesen Raum pflanzt sich nämlich die Wellenbewegung nicht direct fort, es werden daher auch nicht alle Elementarwellen durch entgegengesetzte Wirkungen aufgehoben, sondern diejenigen Elementarwellen, die von den schwingenden Molekülen am Rande ausgehen, breiten sich kugelförmig hinter den Rand aus. Die Zahl dieser Elementarwellen ist eine beschränkte; daher ist die Wellenbewegung hinter dem Rande wesentlich geschwächt und verschwindet in einiger Entfernung von dem Rande ganz. Diese Entfernung ist um so größer, je stärker die Wellenbewegung ist, je länger die Wellen sind und je langsamer dieselben sich fortbewegen, weil dann Kraft und Zeit für die seitliche Bewegung in größerem Maße vorhanden sind. Diese seitliche geschwächte Bewegung aber geht von wenigen mehr oder minder weit von einander entfernten Mittelpunkten aus; sind die Entfernungen derselben gleich einer geraden Anzahl von halben Wellenlängen, so müssen sich die Bewegungen gegenseitig verstärken; sind aber die Entfernungen gleich einer ungeraden Anzahl von halben Wellenlängen, so heben sich je zwei Bewegungen gegenseitig auf und es muß daher eine Schwächung der Bewegung eintreten. Hinter dem Rande werden also Stellen von verstärkter und geschwächter Wellenbewegung mit einander abwechseln.

Fig. 130.



234 **Aufg.** 351. Die Schwingungszeit der Wasserwellen soll der Quadratwurzel aus der Wellenlänge proportional sein und für Wellen von 1^m Länge $1\frac{1}{2}$ Sec. betragen; wie groß ist sie für Wellen von 1^{dm} und von 10^m Länge? Aufl.: $\frac{1}{2}$ und $4\frac{1}{2}$ Sec. — Aufg. 352. Zu zeigen, daß auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Wellen der Wurzel aus der Wellenlänge proportional ist. And.: Man benutze Fl. (25) und den Satz in Aufg. 351. — A. 353. Wie groß sind Elongation und Phasengeschwindigkeit nach $\frac{1}{12}$ und nach $\frac{1}{6}$ der Schwingungszeit? Aufl.: Nach Fl. (28) ist $s = r_2$ und $= r_2 \sqrt{3}$; sodann $v = {}^u/_2 \sqrt{3}$ und $= {}^u/_2$. — A. 354. Wenn die langsamste Schallschwingung $\frac{1}{8}$ Sec. dauert, und der Schall in 1 Sec. 336^m zurücklegt, wie groß ist dann die Welle jenes Schalles? Aufl.: Nach Fl. (25) ist $l = 42^m$. — A. 355. Wie lang ist die Luftwelle des Tones a, wenn die Schwingungszahl desselben $= 440$ ist? Aufl.: $l = 76^{cm}$. — A. 356. Wie viel Schwingungen macht das violette Licht, dessen Wellenlänge $= 0{,}0004^{mm}$, wenn die Geschwindigkeit des Lichtes $= 40\,000$ M. ist. Aufl.: 800 Bill. — A. 357. Welches ist die Wellenlänge dunkler Wärmestrahlen von 200 Bill. Schw. per Sec.? Aufl. $0{,}0016^{mm}$. — A. 358. Zu zeigen, daß der Schall in dichter und dünner Luft gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit besitzt? Aufl.: Benutze Fl. (30) und das Mariotte'sche Gesetz. — A. 359. Wie groß ist die Geschw. des Schalles in Wasserstoff? Aufl.: $336 : \sqrt{0{,}0688} = 1270^m$. — A. 360. Was ist hier gegen die Ansicht einzuwenden, daß der Lichtäther verdünnter Wasserstoff sei? And.: Die Fl. (30), das Mariotte'sche Gesetz, die Geschw. des Schalles in $H = 1270^m$ und die Geschw. des Lichtes $= 40\,000$ M. — A. 361. Was müßte stattfinden, wenn jene Ansicht richtig wäre? And.: Die Dichte des H müßte unendlich viel rascher abnehmen als die Elasticität desselben; vergl. Fl. (30). — A. 362. In welchem Verhältnisse müssen die Elasticität und Dichte des Aethers im Weltraume zu einander stehen, damit die Geschwindigkeit des Lichtes $= 40\,000$ M. sei? And.: $\sqrt{(e : d)} = 40\,000$. — A. 363. Nach welcher Zeit legt eine Wellenbewegung den Weg w zurück? Aufl.: Z

$= w : \sqrt{(e:d)}$. — A. 364. Nach welcher Zeit kommt ein Theilchen, das um $^1/_4$ der Wellenlänge vom ersten entfernt ist, zur Ruhe? Aufl.: Nach Fl. (31) ist $t = {}^1/_2 T$, $^2/_2 T$, $^3/_2 T$ .... — A. 365. Nach welcher Zeit kommt dieses Theilchen wieder in die ursprüngliche Lage? Aufl.: $t = {}^3/_4 T$, $^5/_4 T$ u. s. w., ebenfalls nach Fl. (31). — A. 366. Welche Entfernung müssen die Erregungspunkte zweier violetten Strahlen haben, um sich gegenseitig aufzuheben? Aufl.: $0{,}0002^{mm}$, $0{,}0006^{mm}$, $0{,}001^{mm}$ u. s. w. — A. 367. Welche Entfernung müssen die Tonquellen zweier a besitzen, um sich zu verstärken? Aufl.: 76^{cm}, 152^{cm}, 228^{cm} u. s. w. — A. 368. Welcher Unterschied (Gangunterschied) findet zwischen den Entfernungen der Knoten von den Erregungsstellen zweier entgegengesetzt gerichteten Wellen l statt? Aufl.: $^1/_2 l$, $^3/_2 l$, $^5/_2 l$ .... $^1/_2(2n-1)\,l$. — A. 369. Wenn ein Erregungspunkt um d von einer Wand absteht, wo liegen die Knoten und wo die Bäuche? Aufl.: $(2d - x) - x = {}^1/_2(2n-1)\,l + {}^1/_2 l = {}^1/_2 . 2nl$; hieraus $x = d - {}^1/_2 . nl = d - {}^1/_4 . 2nl$; für die Bäuche $d - {}^1/_4(2n+1)\,l$. — A. 370. Wo liegen die Knoten und Bäuche für ein a, das 300^{cm} von der Wand ertönt? Aufl.: Knoten 262^{cm}, 224^{cm}, 182^{cm}, 148^{cm} ....; Bäuche 281^{cm}, 243^{cm} 201^{cm}, 167^{cm} ....

Fünfte Abtheilung.

Die Lehre vom Schalle oder die Akustik.

1. Definition der Akustik.

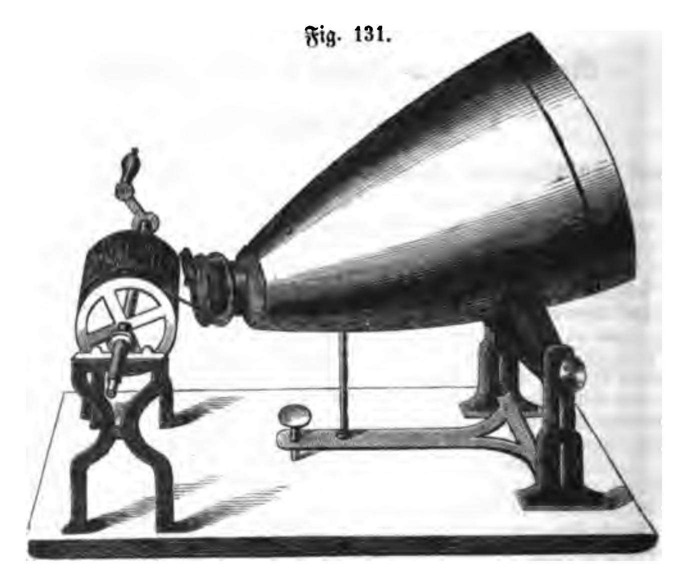
Begriff und Arten des Schalles. Unter dem Schalle versteht man die Einwirkung schwingender Bewegungen auf das Gehörorgan. 235

Daß wirklich der Schall durch Schwingungen entsteht, lehrt in vielen Fällen eine genauere Betrachtung des schallenden Körpers, sowie die Thatsache, daß schallende Körper verstummen, wenn man durch Festhalten ihre Bewegung hemmt; in anderen Fällen überzeugt man sich durch Versuche; tönende Saiten werfen aufgesetzte Reiter von Papier ab; Sand, der auf tönende Platten gestreut wird, hüpft heftig auf und nieder; läßt man in das Innere einer aufrechten tönenden Glaspfeife an Fäden eine mit Sand bestreute Membran hinab, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung; ebenso zittert Bärlappsamen hin und her, wenn derselbe in eine gläserne Röhre gebracht und diese dann durch Reiben zum Tönen gebracht wird (Kundt 1866). Am schönsten kann man sonst unsichtbare Schwingungen schallender Körper z. B. tönender Stimmgabeln durch Lissajous' Lichtfiguren (1855) sichtbar machen. An einer Stimmgabel ist ein Spiegelchen befestigt, auf welches man in einem dunkeln Raume einen Lichtstrahl fallen läßt; von dem Spiegelchen reflectirt, fällt der Strahl auf einen zweiten Spiegel und wird von diesem auf eine Tafel geworfen. Dort entsteht hierdurch ein Lichtpunkt, wenn die Stimmgabel ruht; tönt dieselbe aber, so vibrirt der Punkt hin und her und bildet dadurch einen Lichtstreifen; dreht man während des Tönens den zweiten Spiegel, so entsteht auf der Tafel eine regelmäßige Welle. — Bringt man in eine Glaspfeife feinsten Kieselstaub, so schwebt derselbe, von der Sonne beschienen, in Form glänzender Punkte in der ruhenden Pfeife; aber sowie dieselbe tönt, verwandeln sich alle Punkte in glänzende Linien; betrachtet man dieselben in einem Spiegel, der um eine den Linien parallele Achse gedreht wird, so erscheint jede Linie als eine glänzende Welle (Mach 1872). Betrachtet man eine tönende Saite durch eine stroboskopische Scheibe, d. i. durch eine undurchsichtige, an ihren Rändern mit Schlitzen versehene, [illegible] Scheibe, so kann man bei gehöriger Regulirung der Drehgeschwindigkeit die Schwingungen der Saite deutlich verfolgen (Plateau 1836, Töpler 1866). (Erklärung der stroboskopischen Scheiben s. 346.) — Die Schwingungen eines Körpers üben, ähnlich einer [illegible] Knallgasblase, Stöße auf die Luft aus, die sich auf das Ohr fortpflanzen. [illegible] dieselben hier den Eindruck des Schalles erzeugen, müssen die Amplitude oder Schwingungsweite und die Schwingungsgeschwindigkeit über gewisse Grenzen hinausgehen, [illegible] die Schwingungszahl nicht unterhalb und oberhalb gewisser Grenzen bleiben. Eine [illegible] Schwingung oder eine geringe Anzahl von Schwingungen ist nur hörbar, wenn [illegible] bei einer Explosion, die Amplitude und die Schwingungsgeschwindigkeit groß sind; [illegible] Pendelschwingungen sind trotz großer Amplitude wegen zu geringer Geschwindigkeit [illegible] Eindruck auf das Gehör, während bei einer leise tönenden Saite die auch für das [illegible] Auge unsichtbaren Schwingungen doch noch hörbar sind, weil sie wegen ihrer

großen Schnelligkeit eine größere lebendige Kraft enthalten und daher heftigere Stöße auf die Luft ausüben. Bei zu großer Schwingungszahl geht der Schall in Wärme über. Die Schallschwingungen unterscheiden sich aber von denen des Lichtes und der Wärme nicht blos durch geringere Zahl, sondern auch durch viel größere Amplituden und dadurch, daß viele Theilchen vereint an einer Schwingung Theil nehmen.

Nach der Zahl und der Beschaffenheit der Schwingungen lassen sich folgende Arten von Schall unterscheiden: der Knall besteht aus einer oder einigen großen und raschen Schwingungen; ist die Weite derselben klein, so sinkt der Knall zum Knistern herab. Folgen mehrere stärkere, fast gleiche Knalle auf einander, so entsteht das Rasseln und das Rollen; schwächere, aber etwas rascher auf einander folgende Knalle bilden das Rauschen, Brausen u. a. ähnliche Schalle. Der Ton besteht aus einer noch größeren Zahl von ganz gleichen, schnellen Schwingungen von nicht allzu großer Amplitude; wird die Amplitude zu groß und die Gleichheit der Schwingungen gestört, so wird der Ton zum Geschrei. Jede andere Aufeinanderfolge von ungleichen und unregelmäßig eintretenden Schwingungen bildet ein Geräusch, von dem es viele Arten gibt.

Fig. 131.



Diese Unterschiede sind ebenfalls durch einfache Beobachtungen oder Schlüsse aufzufinden; indessen lassen sich dieselben auch sichtbar machen, am besten mit Scotts Phonautograph (φωνή = Ton, αὐτός = selbst, γράφω = schreiben) (1859), verbessert von König. Dieser Apparat besteht (Fig. 131) aus einem großen hohlen Paraboloid von Zinkblech, das an seinem Scheitelende am Brennpunkte offen und hier mit einer Membran überzogen ist; diese trägt ein leichtes Federchen, dessen Spitze den Mantel eines Cylinders berührt. Der Cylinder wird mittels einer Kurbel um seine Achse gedreht und, da diese eine Schraube ist, auch bei jeder Umdrehung etwas vorangeschoben. Auf dem Mantel befindet sich eine Hülle von berußtem Papier. Wird nun ein Schall erregt, so werden dessen Schwingungen auf der Membran vereinigt und durch das Federchen auf das berußte Papier geschrieben. Ein Knall gibt eine große und meist noch mehrere kleine Wellen, ein Ton eine größere Zahl ganz gleicher Wellen u. s. w.

Da der Schall durch Schwingungen eines begrenzten Körpers entsteht, so werden dessen Schwingungen bekanntlich an seiner Grenze reflectirt und bilden durch Interferenz mit den ursprünglichen Schwingungen stehende Wellen. So bestehen also die meisten Schallarten aus stehenden Schwingungen elastischer Körper, wie es z. B. für die Saitentöne der Augenschein zeigt.

Ausbreitung des Schalles (Newton 1687). **Das gewöhnliche Medium** **236**
für die Ausbreitung des Schalles ist die Luft, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil die schallenden Körper sich meist, ebenso wie das Gehörorgan, in der Luft befinden. **Durch den luftleeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort**, weil der leere Raum keine Körperschwingungen vollbringen kann. Man kann dies nachweisen durch einen zum Schlagen gebrachten Wecker, den man unter die Glocke einer Luftpumpe setzt; je mehr man auspumpt, desto schwächer wird der Schlag; doch gelingt der Versuch nur dann gut, wenn der Wecker entweder an Fäden aufgehängt oder auf Watte gebettet ist. Liegt der Wecker direct auf dem Teller, so wird der Schall selbst bei der stärksten Entleerung nicht sehr schwach; **denn die festen und die flüssigen Körper pflanzen den Schall ebenfalls und sogar besser fort als die Luftarten**, weil sie eine größere Kraft der Elasticität besitzen als diese.

Nachweise dafür sind: Hält man an das eine Ende eines langen Balkens eine Taschenuhr, so kann man am anderen Ende das Ticken derselben hören. — Wheatstone ließ aus dem Keller seines Hauses vier Stangen von Tannenholz durch die Wölbungen und Decken in ein oberes Stockwerk gehen, welche Stangen mit einem Klavier, einer Violine, einem Violoncell und einer Clarinette im Keller in Verbindung standen, und bereitete so seinen Gästen ein unsichtbares Concert. — Bei dem Anfertigen von Telegraphenleitungen liegen die Drähte oft Meilen lang auf dem Boden; wird an dem einen Ende eines solchen Drahtes gefeilt, so hört man das Knirschen der Feile an dem anderen Ende, besonders wenn man das Ende ins Ohr oder zwischen die Zähne nimmt. — Der Blitzdonner ist höchstens 4 Meilen, der Geschützdonner Hunderte von Meilen hörbar. — Setzt man eine schwingende Stimmgabel mit ihrem Fuße in das Wasser einer Röhre, deren Boden ein großes elastisches Brett ist, so klingt der Ton laut auf. — Die Sirene, ein später zu beschreibender Apparat, singt auch unter Wasser.

Die Ausbreitung des Schalles geschieht in allen Medien durch fortschreitende Longitudinalwellen. Denn jeder schallende, also schwingende Körper übt, wenn er aus seiner Gleichgewichtslage herausgeht, einen Stoß auf das umliegende Medium aus. Die nächsten Theilchen dieses Mediums werden daher voranbewegt; sie stoßen folglich in der Richtung ihrer Bewegung auf die folgenden Theilchen und versetzen dieselben in eine fortschreitende Bewegung von derselben Richtung. Diese Theilchen wiederholen denselben Vorgang, und so bewegen sich nach und nach alle Theilchen in derselben Richtung, in der sich die Bewegung fortpflanzt; da nun auch alle Theilchen wieder zurückkehren müssen, so haben wir eine longitudinale Wellenbewegung, deren Eigenschaften wir noch etwas näher untersuchen wollen.

Der erste Stoß des schwingenden Körpers überträgt sich auf die Theilchen des Mediums bis in um so größere Entfernung, je größer die Elasticität desselben ist; die ersten dieser Theilchen haben, wenn der schwingende Körper den größten Ausschlag erreicht hat, nahezu dieselbe Bewegung vollendet, die folgenden haben einen kleineren Weg zurückgelegt, und letzten dieser Theilchen beginnen erst ihre Bewegung; folglich müssen diese Theilchen einander genähert haben, das Medium muß verdichtet sein. Geht die Bewegung jedes Theilchens pendelartig vor sich, so haben die ersten und die letzten Theilchen die kleinste, mittleren die größte Geschwindigkeit; folglich muß bei diesen die Verdichtung am stärksein, und so wie die Theilchen nach und nach die größte Geschwindigkeit erreichen, so auch die Stelle der größten Verdichtung immer weiter voranschreiten, während an eben betrachteten Stelle eine Verdünnung eintritt. Denn die ersten Theilchen des neben dem schwingenden Körper kommen fast mit diesem zur Ruhe, und kehren mit diesem pendelartig in die ursprüngliche Lage zurück. Während dieses Rückganges die mittleren Theilchen allmälig zur Ruhe gekommen und umgekehrt, die letzten haben größte vorangehende Geschwindigkeit erreicht und sind danach zur Ruhe gelangt. Folghaben sich diese Theilchen von einander entfernt, die ganze früher verdichtete Stelle ist verdünnt; die größte Verdünnung ist an der Stelle der größten Geschwindigkeit, also in der Mitte, weil die ersten Theilchen am Schlusse ihres pendelartigen Rückweges die letzten im Beginne desselben sind und daher die kleinsten Geschwindigkeiten haben. also alle Theilchen der jetzt verdünnten Stelle in der Rückkehr begriffen sind, so sind

alle Theilchen der indessen entstandenen Verdichtung im Vorangehen, zwischen beiden sind die Theilchen in Ruhe. Verdichtung und Verdünnung bilden mit einander eine Welle, für welche, wie leicht ersichtlich, die früher gefundenen Sätze gelten.

Diese fortschreitenden Longitudinalwellen lassen sich sichtbar machen mit Wheatstones Wellenapparat oder mit Müllers Wellenscheibe.

Die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft ist durchschnittlich = 333^m^ oder ca. 1024′ Par.

237 **Der Ton.** Der wichtigste Schall ist der Ton. Der Ton besteht aus periodischen Bewegungen, d. h. aus Schwingungen, welche gleiche Dauer, gleiche Amplitude und gleiche Form haben. Wegen dieser Gleichheit der Tonschwingungen lassen sich am Tone die Schallbewegungen überhaupt am Besten untersuchen. An den Tönen sind drei Unterschiede auffallend und allbekannt, die Unterschiede in der Tonhöhe, in der Tonstärke und in der Tonfarbe. Die Tonhöhe ist der Eindruck der Schwingungsdauer; ein Ton ist um so höher, je kleiner die Dauer oder je größer die Zahl seiner Schwingungen (in 1 Sec.) ist. Die Tonstärke oder Intensität des Tones ist der Eindruck der lebendigen Kraft der Schwingungen; sie steht deßhalb in gesetzmäßigem Zusammenhange mit der Amplitude und mit der Schwingungsgeschwindigkeit. Die Tonfarbe oder die Klangfarbe ist der Eindruck der Form der Schwingungen; denn eine wesentlich andere Schwingungsform muß einem Tone von derselben Höhe und derselben Stärke offenbar einen anderen Character, ein anderes Gepräge geben, das man eben mit dem Namen Tonfarbe oder Klangfarbe bezeichnet. Diese drei Definitionen sind durch Versuche festzustellen: wir betrachten zuerst die Tonhöhe.

Die Tonhöhe wächst mit der Schwingungszahl des Tones (Mersenne 1636).

Hält man ein Kartenblatt gegen die Zähne eines sich drehenden Zahnrades, so entsteht ein Ton, der um so höher wird, je schneller man das Rad dreht. — Drückt man eine Stricknadel zum Theil fest auf eine Tischplatte und läßt den hervorragenden Theil schwingen, so sieht man denselben um so schneller schwingen und hört ihn um so höher tönen, je kürzer er ist. — Legt man Trevelyans Wackler (1829), eine mit stumpfwinkliger Doppelkante versehene Metallplatte, in erhitztem Zustande auf einen Bleiklotz, so wird das Blei erhitzt und stößt durch seine Ausdehnung den Wackler bald an der einen, bald an der anderen Kante ab; dadurch wackelt das Instrument auf dem Bleiklotze hin und her und gibt einen um so höheren Ton, je schneller die Wiegung vor sich geht. — Am besten aber ist die Definition der Tonhöhe ersichtlich durch die Sirene. — Seebecks Pappscheibensirene (1837) besteht aus einer auf der Schwungmaschine rasch drehbaren Scheibe von Pappe (oder auch von Metall), welche einen oder mehrere Kreise von Löchern enthält. Bläst man mit einem Rohre auf den Löcherkreis, so wird in jedem Augenblicke, wo ein Loch unter dem Rohre vorbeigeht, ein Stoß auf die jenseits befindliche Luft ausgeübt; folglich entstehen bei jeder Umdrehung soviele Schwingungen, als die Sirene Löcher hat; je schneller man sie dreht, um so höher wird der Ton. — Macht man die Schwingungen zweier Töne nach Lissajous' Methode leuchtend, so sieht man, daß dem höheren Tone auf derselben Strecke der Tafel mehr leuchtende Wellen zugehören als dem tieferen.

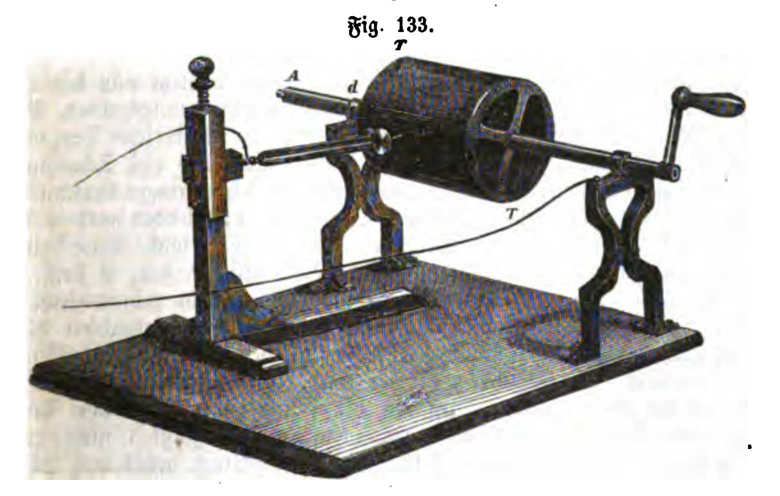
Fig. 132.

238 **Das Zählen der Schwingungen eines Tones.** Sehr geeignet zum Auffinden der Schwingungszahl eines Tones ist die Sirene von Cagniard-Latour (1825) (Fig. 132), bei welcher das durchlöcherte Rad von dem Luftstrome selbst gebreht wird. Zu diesem Zwecke dient eine kleine Metalltrommel, der Windkasten B, die mit einer Bodenröhre R auf einen Blastisch gesetzt wird und so den Luftstrom aufnimmt; der Deckel trägt im Kreise stehende, schief gebohrte Löcher. Unmittelbar über dem Deckel sitzt das Sirenenrad C, das in einem gleichen Kreise nach entgegengesetzter Richtung schief gebohrte Löcher hat. Gehen nun die Luftströme aus den Oeffnungen des Deckels, so stoßen sie gegen die Löcherwände des Rades und drehen dasselbe. Durch stärkeres Anblasen dreht sich das Rad immer schneller und gibt einen immer höheren Ton, der wegen der größeren Anzahl der wirksamen Luftströme auch eine ziemliche Stärke erreicht. Das Sirenenrad sitzt auf einer Achse AF welche durch eine Schraube ohne Ende

in ein Zahnrad eines Zählwerkes eingreift. Hat durch Reguliren des Anblasens der Ton eine gleich bleibende Höhe erreicht, so setzt man durch einen Druck auf die Feder f das Zählwerk in Thätigkeit und hemmt es nach einer bestimmten Zeit z. B. nach 1 Min. durch einen Druck auf den Knopf a; an den Zeigern des Zählwerkes findet man die Zahl der Umdrehungen des Sirenenrades; diese multiplicirt mit der Zahl der Löcher und dividirt durch 60 gibt die Schwingungszahl des Tones.

Um die Schwingungszahl eines Tones eines anderen Instrumentes zu bestimmen, setzt man die Sirene allmälig in Gang; nähert sich ihr Ton dem fraglichen, so entstehen, wie später erhellen wird, Stöße oder Schwebungen, deren Zahl immer kleiner wird, und welche bei völliger Uebereinstimmung der beiden Töne ganz verschwinden. Stimmt z. B. der Sirenenton mit dem eingestrichenen a (geschrieben $\bar{a}$ oder nach dem Vorschlage von Sondhauß a_1), also mit dem Tone, den die Instrumente beim Stimmen vorzugsweise hören lassen, den eine Frauenstimme mit Leichtigkeit, eine Tenorstimme nur mit einiger Anstrengung singen kann, und findet sich, daß ein Sirenenrad mit 15 Löchern 1750 Drehungen in 1 Minute macht, so ist die Schwingungszahl von $a_1 = 1750 . 15 : 60 = 437\frac{1}{2}$. Auch mit Scotts Phonautograph, sowie mit jedem anderen Vibrograph kann man die Schwingungszahl bestimmen, wenn derselbe mit einer Vorrichtung versehen ist, die den Anfangs- und den Endpunkt der Zeit auf der Wellenlinie bezeichnet. Der Gedanke der Vibrographie rührt von Wilhelm Weber (1830) her; doch bestand dessen Apparat nur aus einer berußten Glasplatte, über welche er eine mit einem Federchen versehene tönende Stimmgabel in der Hand gleichmäßig hinführte. Duhamels Vibrograph (1859) Fig. 133 besteht aus einem durch eine Schraubenachse drehbaren und verschiebbaren Cylinder T mit einem Mantel von berußtem Papier, auf dem ein mit dem tönenden Körper verbundenes Federchen schleift. Dieses Federchen zeichnet die Wellenlinie des Tones auf das Papier; markirt nun ein Zeitapparat auf dieser Linie den Anfangs- und den Endpunkt einer Secunde, so gibt die Zahl der Wellen zwischen den beiden Marken die Schwingungszahl. — Auch mittels Appunns Tonmesser (1865), der auf den Stößen (s. 266.) beruht, kann man die Schwingungszahl von Tönen genau finden.

Fig. 133.



Tiefste und höchste Töne. Nicht jede beliebige Schwingungszahl wird von dem nschlichen Ohre als Ton empfunden; nach Helmholtz beginnt die Tonempfindung bei 30 wingungen, erreicht aber erst bei 40 Schwingungen eine bestimmte musikalische Höhe. niger als 30 Schwingungen bringen mehr den Eindruck einzelner Stöße hervor; doch Savart noch 8 sehr starke Stöße zu einem Tone vereinigt gehört haben. Noch weniger cherheit herrscht über die obere Grenze, besonders deßhalb, weil die Ohren an Wahrmungsfähigkeit der höchsten Töne verschieden sind; es ist belustigend, in einer Gesellft Jemand über den schrillen Ton einer kleinen Pfeife klagen zu hören, während Andere upten, daß dieselbe gar nicht töne (John Herschel). Brewster hörte das Zirpen einer lle nur mit einem Ohre; als Tyndall auf der Wengernalp sich über die Musik zahlreicher ecten freute, war sein mitwandernder Freund ganz taub für dieselbe. Savart und ere verlegen die obere Grenze auf 38 000 Schwingungen. — Ueber die „Grenzen der

Tonwahrnehmung“ liegen entscheidende Untersuchungen von Preyer (1876) vor. Für die Wahrnehmung der tiefsten Töne hat derselbe den *Grundtöneapparat* construirt, aus Appunn'schen Zungen bestehend, welche 8 bis 40 Schw. in 1 Secunde vollziehen und noch weiter schwingen, wenn ihre Obertöne schon verklungen sind. Die Versuche ergaben, daß 8—14 Schwingungen wohl gesehen und als Luftstöße gespürt, aber nicht gehört werden, daß 14 bis 24 Schwingungen von dem Einen gehört werden, von dem Anderen nicht, daß aber 24 Schwingungen von jedem normalen Gehör als tiefer, mild summender Ton empfunden werden. Für die höchsten Töne ist Appunns *Tongrenzeapparat* construirt worden, der aus 31 sehr kleinen Stimmgabeln besteht, von denen die größte c_4 mit 2048 Schwingungen und die kleinste e_8 mit 40 960 Schw. erzeugt, wenn sie mit Violinbogen gestrichen werden. Die höchsten Töne sind für viele, besonders für ältere Leute unhörbar; andere hören alle Töne, jedoch mit schmerzhaften Nebenempfindungen, z. B. als ob in das Ohr mit einer sehr feinen Nadel hineingestochen würde.

Im Orchester ist der tiefste Ton das Contra-E (e_{-2}) des Contrabasses mit 41 Schw., der höchste das fünfgestrichene d (d_5) der Piccoloflöte mit 4752 Schw. Die menschlichen Singstimmen liegen zwischen 64 und 1500 Schw., höher scheinen einige Consonanten zu sein. Flügel gehen bis zu a_{-3} von 27 Schw., große Orgeln sogar bis zu c_{-3} mit 16 Schw.; doch meint Helmholtz, daß diese tiefsten Orgeltöne durchaus nicht so wenig Schw. vollzögen, sondern ein Gemisch von Obertönen seien. In der Höhe wird die Pfeife von den Klavieren nicht erreicht; dieselben gehen meist nur bis zu a_4 mit 3520, manche bis zu c_5 mit 4224 Schw. Höher noch, aber nicht ganz bestimmt, sind die Töne der Vögel, der Grillen und anderer Insecten; nach Untersuchungen von Landois (1869) haben viele Insecten, z. B. kleine Fliegen und Bockkäfer Stimmen, die für das menschliche Gehör zu hoch sind und daher von uns nicht wahrgenommen werden. Der tiefste Insectenton scheint der Flugton der Mooshummel a = 217 zu sein; der Flugton der Bienen und Fliegen ist meist eine Octave höher etwa = 400; nicht viel höher sind die Stimmen der Hummeln, Mücken und Fliegen, etwa 500—600 Schw.; die Stimmen der Bienen aber liegen höher, bei 1000—1500 Schw. — Die menschliche Pfeifstimme liegt zwischen c_1 mit 262 und c_4 mit 2112 Schw. — Während die Töne nach Preyer überhaupt durch die Zahlen 14 und 40 000 begrenzt sind, liegen die musikalisch brauchbaren zwischen 40 und 5000 Schwingungen.

239 **Die Intervalle.** Unter dem Intervall zweier Töne versteht man den Höhenabstand derselben, ausgedrückt durch das Verhältniß der Schwingungszahlen. Mittels der Sirene läßt sich nämlich nicht nur nachweisen, daß ein und derselbe Ton von den verschiedensten Instrumenten hervorgebracht immer aus gleich viel Schwingungen besteht, sondern es läßt sich auch zeigen, daß Töne von sehr geringer Verschiedenheit der Schwingungszahl von dem menschlichen Ohre nicht unterschieden werden können. Da nun außerdem, wie sich durch zwei Sirenen zeigen läßt, solche Töne beim Zusammenklingen Stöße erzeugen, die dem Ohre höchst lästig werden, so sind in der Musik Töne mit wenig verschiedenen Schwingungszahlen nicht gebräuchlich. Auch solche Töne, die weiter von einander abstehen, deren Schwingungszahlen aber ein nur durch große Zahlen ausdrückbares Verhältniß haben, sind ausgeschlossen, weil dieselben ebenfalls, wie sich später ergeben wird, beim Zusammenklingen unangenehm auf das Gehör wirken. In der Musik sind daher nur solche Töne zugelassen, deren Schwingungszahlen in einem einfachen, der Zahl 1 nicht zu nahe liegenden Verhältnisse zu einander stehen; dieses Verhältniß drückt den Höhenabstand der Töne von einander aus und wird daher ebenso, wie dieser, Intervall genannt. Die einfachsten Intervalle bilden diejenigen Töne, welche 2, 3, 4, 5 ... mal so viel Schwingungen machen, als ein anderer Ton, den man, um die Begriffe zu fixiren, den *Grundton* nennt; diese Töne haben den Namen *„die harmonischen Obertöne“* des Grundtones erhalten. Der Ton, welcher 2 mal so viel Schwingungen als der Grundton macht, dessen Intervall also 2 : 1 ist, wird die Octave genannt. Weil sein Verhältniß zu dem Grundtone das denkbar einfachste ist, so erscheint unserem Gehöre dieser Ton auch sehr nahe mit dem Grundtone verwandt, so nahe, daß wir ihn sogar mit demselben Buchstaben bezeichnen, daß wir ihn denselben Ton eine Octave höher nennen. Da nun noch viele Verhältnisse möglich erscheinen, die kleiner als 2 : 1 und dennoch einfach sind, so liegt

auch zwischen dem Grundtone und seiner Octave noch eine Anzahl von Intervallen. Die nächst einfachen Verhältnisse sind $1\frac{1}{2} : 1$ oder $3 : 2$ und $1\frac{1}{4} : 1$ oder $5 : 4$; man nennt die Töne, welche $\frac{3}{2}$ und $\frac{5}{4}$ mal so viel Schwingungen machen als der Grundton, die Quinte und die Terz des Grundtones; dieselben erscheinen dem Gehöre noch sehr nahe verwandt mit dem Grundtone, sie machen beim Zusammentönen mit demselben einen angenehmen Eindruck. Das Intervall $1\frac{3}{4} : 1$ oder $7:4$ wird in der Musik nicht angewendet; nach Helmholtz macht dasselbe zwar an sich noch einen günstigen Eindruck, obgleich man aus der geringen Einfachheit und Unzerlegbarkeit der Zahl 7 das Gegentheil schließen sollte; allein es steht zu der Octave 2 in dem zu complicirten Verhältnisse $8 : 7$ und läßt daher keine Verbindung mit der Octave, keine Umkehrung zu; ebenso fehlen auch die Intervalle, die durch noch größere Primzahlen 11, 13, 17 ... ausgedrückt werden. Die nächst einfachen Verhältnisse sind offenbar $1\frac{1}{3} : 1$ oder $4 : 3$ und $1\frac{2}{3} : 1$ oder $5 : 3$; die Töne, welche $\frac{4}{3}$ und $\frac{5}{3}$ mal so viel Schwingungen als der Grundton enthalten, werden die Quarte und die Sexte genannt; sie klingen ebenfalls noch befriedigend mit dem Grundtone zusammen. Man nennt solche Töne, welche zusammen einen angenehmen Eindruck auf das Gehör machen, consonirend oder consonant und das Zusammentönen selbst eine Consonanz; diejenigen Töne dagegen, welche zusammen unangenehm auf das Ohr wirken, werden dissonirend oder dissonant und ihr Zusammenklang eine Dissonanz genannt. Die fünf genannten Töne bilden mit dem Grundtone Consonanzen; die außer ihnen noch denkbaren bilden unvollkommnere Consonanzen oder gar Dissonanzen, weil ihr Schwingungszahlenverhältniß zu dem Grundtone nicht mehr einfach ist. Wegen der leichten Theilbarkeit der Zahl 8 liegen die Verhältnisse mit dem Nenner 8 noch am nächsten; $\frac{11}{8}$ und $\frac{13}{8}$ sind ausgeschlossen; also bleiben nur noch $\frac{9}{8}$ und $\frac{15}{8}$. Diese Verhältnisse geben zwar keine consonanten Töne; doch füllt $\frac{9}{8}$ die zu große Lücke zwischen 1 und $\frac{5}{4}$, ebenso wie $\frac{15}{8}$ die Lücke zwischen $\frac{5}{3}$ und 2 ausfüllt. Deßhalb und aus anderen später erhellenden Gründen sind die Töne, welche $\frac{9}{8}$ und $\frac{15}{8}$ mal so viel Schwingungen als der Grundton vollführen, in die Reihe der genannten 6 Töne eingeschoben. Das Intervall $\frac{9}{8}$, welches dem Grundtone oder der Prime am nächsten liegt, heißt deßhalb Secunde, und das Intervall $\frac{15}{8}$ aus gleichem Grunde die Septime. Auch die Namen aller übrigen Intervalle erklären sich aus der Stellung in der nun folgenden Reihe der 8 einfachsten Intervalle, welche Reihe diatonische Tonleiter genannt wird:

Prime,	**Secunde,**	**Terz,**	**Quarte,**	**Quinte,**	**Sexte,**	**Septime,**	**Octave.**
$\frac{1}{1}$,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	$\frac{2}{1}$.

Man kann diese Verhältnisse nachweisen durch eine Sirene mit 8 Löcherkreisen, von nen der kleinste z. B. 24 Löcher enthält; finden sich in den anderen Kreisen $\frac{9}{8} . 24 = 27$, $. 24 = 30$, $\frac{4}{3} . 24 = 32$, $\frac{3}{2} . 24 = 36$, $\frac{5}{3} . 24 = 40$, $\frac{15}{8} . 24 = 45$, $2 . 24 = 48$ Löcher, bläst man bei gleich bleibender Drehungsgeschwindigkeit die Kreise nach und nach an, hört man die bekannten Töne der diatonischen Tonleiter.

Um die Intervalle besser benennen und in den verschiedenen Octaven (wie man auch ganze Tönezahl zwischen Grundton und Octave nennt) besser unterscheiden zu können, es mit jenen Wortnamen möglich ist, hat man Buchstaben- oder Silbennamen eingeführt, in den nördlichen Ländern die Buchstaben c, d, e, f, g, a, h, c, in den südlichen Silben ut (do), re, mi, fa, sol, la, si. Diese letzteren wurden 1026 von dem Benetiner Guido von Arezzo aus folgendem Verse entnommen:

Ut queant laxis resonare fibris
Mira gestorum famuli tuorum.
Solve polluti labii reatum
Sancte Johannes.

n demselben Musiker rührt auch die Schreibweise der Töne als Noten auf Notenlinien verschiedenen Schlüsseln her. Die in Deutschland übliche Buchstabenbenennung ist

älter und hat wahrscheinlich ihren Urheber in Gregor dem Großen (591—604), vielleicht schon in St. Ambrosius (geb. 353). Ursprünglich hatte man die Buchstaben in alphabetischer Reihenfolge a, b, c, d, e, f, g, worin b unser h = $^{15}/_8$ bedeutete. Später wurde noch ein Ton zwischen a und b eingeschoben und ebenfalls b genannt; zum Unterschiede von dem damals üblichen gothischen b (b quadratum = ♮), aus welchem die Bezeichnung h hervorgegangen ist, gab man dem eingeschobenen Tone das lateinische b (b rotundum) als Zeichen, wodurch dieser Ton die auch jetzt noch gebräuchliche, ganz abweichende Benennung hat. Diese einmal eingeführten Namen für die älteste Tonleiter wurden auch beibehalten, als man erkannte, daß die Tonleiter mit dem Grundtone c die eigentliche Normaltonleiter ist, weil in derselben die Noten d, e, f, g, a, h, c ohne weitere Veränderung die Reihe der oben betrachteten Hauptintervalle geben; hierdurch erklärt es sich, daß unsere gewöhnliche Tonleiter die alphabetische Reihenfolge verloren hat.

Die diatonische Tonleiter wird nicht blos auf dem einen Grundtone c, sondern auch auf dessen höheren und tieferen Octaven aufgebaut; die Töne dieser neuen Tonleiter sind ebenfalls die Octaven der ersten und werden daher mit denselben Buchstaben bezeichnet. Um aber die verschiedenen gleichnamigen Töne unterscheiden zu können, hat man auch den Octaven Namen gegeben. So wird die Octave in der Mitte der Männerstimmen die kleine Octave genannt und demgemäß mit kleinen Buchstaben (c bis h), nach Sondhauß mit c^0 bis h^0 geschrieben; die nächst höhere Octave, in der Mitte der Frauenstimmen, heißt die eingestrichene, die folgende die zweigestrichene u. s. w., und werden dieselben mit 1, 2, 3 . . . Querstrichen über den kleinen Buchstaben geschrieben, nach Sondhauß mit den positiven Exponenten 1, 2, 3 u. s. w. Die Octave unter der kleinen heißt die große; sie wird mit großen Buchstaben geschrieben; die Octaven unter derselben erhalten 1, 2, 3 . . . Querstriche unter den großen Buchstaben und heißen Contra-Octave, Subcontra-Octave, dreimal unterstrichene Octave. Sondhauß setzt statt dessen kleine Buchstaben mit negativen Exponenten; diese Bezeichnungsart ist die einfachste und bietet sonst noch Vortheile; sie ist daher in diesem Buche durchweg angewendet worden, jedoch mit den Ziffern unten, statt oben rechts, also Indexe statt Exponenten und mit Weglassung des Index 0. Zur Vergleichung dient nachstehende Tabelle.

Dreimal unterstrichenes C =	$\underline{\underline{\underline{C}}}$	c_{-4},	C_3	C'''	ut_{-2}
Subcontra-C =	$\underline{\underline{C}}$	c_{-3},	C_2	C''	ut_{-1}
Contra-C =	$\underline{C}$	c_{-2},	C_1	C'	ut_0
Großes C =	C	c_{-1},	C	C	ut_1
Kleines c =	c	c	c	c	ut_2
Eingestrichenes c =	$\overline{c}$	c_1	c_1	c'	ut_3
Zweigestrichenes c =	$\overline{\overline{c}}$	c_2	c_2	c''	ut_4
Dreigestrichenes c =	$\overline{\overline{\overline{c}}}$	c_3	c_3	c'''	ut_5 u. s. w.

240 **Ganze und halbe Töne.** Vergleicht man die Zwischenräume oder Intervalle von je zwei neben einander stehenden Tönen der diatonischen Tonleiter, indem man jedes folgende Verhältniß durch das vorhergehende dividirt, so ergibt sich, daß diese Intervalle einander nicht ganz gleich sind. Zwischen Prime und Secunde liegt das Intervall $^9/_8$, zwischen Secunde und Terz $^5/_4 : {}^9/_8 = {}^{10}/_9$, sehr nahe = $^9/_8$, zwischen Terz und Quarte $^{16}/_{15}$, zwischen Quarte und Quinte $^9/_8$, zwischen Quinte und Sexte $^{10}/_9$, zwischen Sexte und Septime $^9/_8$, zwischen Septime und Octave $^{16}/_{15}$. Das große Intervall $^9/_8$ und das demselben sehr nahe liegende $^{10}/_9$ findet sich 5mal; man nennt dieses Intervall einen ganzen Ton und unterscheidet nach den zwei Werthen des Intervalls einen großen ganzen Ton = $^9/_8$ und einen kleinen ganzen Ton = $^{10}/_9$. Das Intervall des großen und des kleinen ganzen Tones beträgt $^{81}/_{80}$ und wird Komma genannt. Das kleine Intervall $^{16}/_{15}$ findet sich in der ganzen Tonleiter nur 2mal; man nennt dasselbe einen halben Ton, weil es ungefähr halb so groß ist als das Intervall des ganzen Tones. Es gibt indeß auch einen kleinen halben Ton, nämlich das Intervall zwischen dem eben genannten halben Ton und dem kleinen ganzen Ton = $^{10}/_9 : {}^{16}/_{15} = {}^{25}/_{24}$. Die Intervalle der ganzen Töne sind sehr groß, und die halben Töne sind noch leicht von einander zu unterscheiden; es liegt daher nahe

in diese großen Intervalle noch halbe Töne einzuschalten, die man entweder als Erhöhungen der vorausgehenden oder als Erniedrigungen der nachfolgenden Töne auffassen kann. Man bezeichnet sie im ersten Falle durch ein Kreuz (#) vor der Note und durch die an den Buchstaben gehängte Silbe is (in Frankreich durch das Wort dièse), im zweiten Falle durch ein b vor der Note und die an den Buchstaben gehängte Silbe es (in Frankreich durch das Wort bèmol). Hierdurch sind vom Grundtone bis zur Octave 12, vom Grundtone bis zur Quinte 7 halbe Töne vorhanden. Die Einschaltung dieser halben Töne wird auch dadurch nöthig, daß man in der Musik jeden Ton als Grundton benutzen will. Will man den nächstverwandten Ton des Grundtones c, die Octave c_1 als Grundton gebrauchen, so sind dafür nur die Octaven der einzelnen Töne der diatonischen Tonleiter nöthig; diese reichen aber nicht aus, wenn man den nach der Verwandtschaft folgenden Ton, die Quinte g, als Grundton benutzen soll.

Alsdann ist vorhanden die Secunde a ; denn $a : g = 5/3 : 3/2 = 10/9$, (nicht ganz $9/8$)
die Terz h ; denn $h : g = 15/8 : 3/2 = 5/4$,
die Quarte c_1 ; denn $c_1 : g = 2 : 3/2 = 4/3$,
die Quinte d_1 ; denn $d_1 : g = 2 . 9/8 : 3/2 = 3/2$,
die Sexte e_1 ; denn $e_1 : g = 2 . 5/4 : 3/2 = 5/3$,
aber es fehlt die Septime; denn $f_1 : g = 2 . 4/3 : 3/2 = 16/9$, aber nicht $= 15/8$.

Man muß folglich zwischen f_1 und g_1 einen Ton einschalten, der $15/8$ von g, also $15/8 : 5/3 = 9/8$ von e_1 ist, der also von e_1 um einen ganzen Ton, folglich von f_1 um einen halben Ton entfernt liegt. Dieser Ton kann demnach als eine Erhöhung von f_1 um einen halben Ton, als fis_1 aufgefaßt werden; doch kann man ihn auch als eine Erniedrigung von g_1 um einen halben Ton, als ges_1 ansehen, weil $2 : 16/15 = 15/8$. Aus dieser auf g sich erhebenden Tonleiter folgt auch die Nothwendigkeit der Secunde d und der Septime h von c; denn ohne diese zwei Töne würden die Quinte und die Terz von g fehlen. — So wie sich hier die Nothwendigkeit von fis oder ges ergab, so ergibt sich das Bedürfniß noch mehrerer halben Töne, wenn man außer c und g noch andere Töne als Grundtöne benutzen will; für die folgende Quinte d als Grundton ist ein zweiter halber Ton zwischen c und d, cis oder des genannt, erforderlich, für eine weitere Quinte a ein dritter halber Ton gis oder as zwischen g und a u. s. w.; in derselben Weise zeigt sich, daß für jede folgende Quinte als Grundton ein neuer halber Ton nöthig ist. Hieraus würde folgen, daß unendlich viele halbe Töne verlangt werden müßten; doch ist dies nicht der Fall, weil man beim Fortschreiten in Quinten von c aus endlich wieder auf ein c zurückkommt, weil also die Quinten einen Cirkel in den Octaven bilden; dies ist schon daraus ersichtlich, daß 7 Octaven $7 \times 12 = 84$ halbe Töne enthalten und 12 Quinten ebenfalls $12 \times 7 = 84$ halbe Töne einschließen, wobei aber vorausgesetzt ist, daß die halben Töne überall dieselben sind. Ein solcher Quintencirkel ist z. B. folgende Notenreihe:

c_{-2}, g_{-2}, d_{-1}, a_{-1}, e, h, fis_1, cis_2, gis_2, dis_3, ais_3, eis_4, $his_4 = c_5$.

Da in dieser Reihe sämmtliche Töne der diatonischen Tonleiter stehen, so sind auch nur 11 Erhöhungen nöthig, von denen aber 7 schon Erhöhungen sind, also durch die zweite Erhöhung auf einen schon vorhandenen Ton kommen; folglich sind eigentlich nur fünf halbe Töne einzuschalten, nämlich zwischen c und d, d und e, f und g, g und a, a und h. Indessen müssen doch öfter mehr als 5, z. B. bei der Tonleiter auf dis 9 Erhöhungen vorgenommen werden; um die hierzu nöthigen 9 Kreuze zu umgehen, faßt man die letzten 5 oder 6 Noten als Erniedrigungen, eis als f, ais als b, dis als es, gis als as, cis als des, fis als ges und läßt auch die Noten der Tonleiter durch Erniedrigung geschehen, wodurch die vorausgegangenen Erhöhungen aufgehoben und dadurch nur wenige b als Vorzeichen nöthig werden. So ist z. B. die Tonleiter:

von dis als Erhöhung = dis, eis, fisis, gis, ais, his, cisis, dis
von es als Erniedrigung = es, f, g, as, b, c, d, es; folglich sind statt 9 Kreuzen nur 3 b nöthig; ähnlich bei der Tonleiter von f oder eis statt 11 Kreuzen nur 1 b, wodurch die Schreibweise der Tonleitern viel einfacher wird.

Die durch Einschaltung von 5 halben Tönen in die diatonische Tonleiter entstandene neue Tonleiter wird die chromatische genannt. Dieselbe enthält natürlich eine Reihe neuer Intervalle, die man durch die Wörter „übermäßig" und „vermindert" oder auch „groß" und „klein" bezeichnet. Von besonderem Interesse sind die Töne, welche durch die Erniedrigung der Terz $5/4$ und der Sexte $5/3$ um einen kleinen halben Ton $25/24$ entstehen; dieselben stehen zum Grundtone in dem Verhältnisse $5/4 : 25/24 = 6/5$ und $5/3 : 25/24 = 8/5$, offenbar ziemlich einfache Verhältnisse, so daß diese Töne, die kleine Terz und die kleine Sexte

zum Grundtone noch einigermaßen consonant sind. Aehnlich verhält es sich mit der kleinen Septime, die durch Erniedrigung der Septime $^{15}/_{8}$ um den kleinen halben Ton entsteht $= {}^{15}/_{8} \cdot {}^{25}/_{24} = {}^{9}/_{5}$. Die kleine Terz und die kleine Sexte können zwar auch als Erhöhungen der Secunde und der Quinte um den halben Ton $^{16}/_{15}$ aufgefaßt werden; in der Musik werden sie jedoch als Erniedrigungen der Terz und der Sexte aufgefaßt und durch b vor der Terz und Sexte bezeichnet. Die Tonleiter, welche statt der Terz und der Sexte die kleine Terz und die kleine Sexte enthält, klingt nicht so befriedigend als jene, nicht so hell und heiter, mehr dunkel und düster; man nennt sie die Moll-Tonleiter und die andere mit der großen Terz und der großen Sexte die Dur-Tonleiter, Namen, welche von den bekannten Zeichen b für die zwei Erniedrigungen und ♮ für die Wiederauflösungen derselben hergenommen sind und durchaus nicht einen Gegensatz von weich und hart in dem Character der Tonarten ausdrücken sollen.

241 **Die Temperatur.** Diejenige Stimmung der Instrumente oder des Vortrages, durch welche alle Intervalle die angegebenen einfachsten Schwingungszahlenverhältnisse erhalten, nennt man die natürlich reine Stimmung. In der Normaltonleiter, der sogenannten c-dur Tonleiter findet sich zwischen Terz und Quarte, sowie zwischen Septime und Octave der halbe Ton $^{16}/_{15}$. Sollen alle anderen Tonleitern ebenfalls dieselbe natürlich reine Stimmung haben, so müßten auch alle halben Töne $= {}^{16}/_{15}$ sein. Diese Grundbedingung der natürlich reinen Stimmung ist aber nicht zu erfüllen, wenn man zwischen die 7 Töne der diatonischen Tonleiter nur noch 5 halbe Töne einschaltet, also nur die gewöhnliche chromatische Tonleiter anwendet. Hierdurch werden auch noch andere Grundbedingungen der natürlich reinen Stimmung nicht erfüllt, wie folgende Beispiele zeigen:

Zwei halbe Töne der chromatischen Tonleiter geben einen ganzen Ton; zwei reine halbe Töne nach einander erzeugen aber das Intervall $^{16}/_{15} \cdot {}^{16}/_{15} = {}^{2048}/_{1800}$, das weder mit dem großen ganzen Tone $^{9}/_{8} = {}^{2025}/_{1800}$, noch mit dem kleinen ganzen Tone $^{10}/_{9} = {}^{2000}/_{1800}$ übereinstimmt. — In der chromatischen Tonleiter ist ein halber Ton eine Erhöhung des tieferen und gleichzeitig eine Erniedrigung des höheren Tones; eine Erhöhung von c aber um den reinen halben Ton gibt $^{16}/_{15}$, eine Erniedrigung des d um einen reinen halben Ton gibt $^{135}/_{128}$; folglich stimmt in der natürlich reinen Stimmung das cis nicht mit des überein, ebenso wenig dis mit es, fis mit ges u. s. w.; ein Instrument mit natürlich reiner Stimmung müßte zwischen je 2 ganzen Tönen zweierlei halbe Töne enthalten. — In der chromatischen Tonleiter ist z. B. a die Quinte von d, folglich müßte $a = {}^{3}/_{2}$ von $^{9}/_{8}$, also $= {}^{27}/_{16}$ sein; es ist aber $^{5}/_{3}$, was sich von $^{27}/_{16}$ um $^{81}/_{80}$ unterscheidet; in der natürlich reinen Stimmung müßte also z. B. ein anderes a für d-dur, als für c-dur vorhanden sein. — In der chromatischen Tonleiter geben 3 große Terzen zu je 4 halben Tönen eine Octave von 12 halben Tönen; sollen aber die 3 großen Terzen natürlich rein $= {}^{5}/_{4}$ sein, so kommt man durch dieselben auf das Intervall $^{5}/_{4} \cdot {}^{5}/_{4} \cdot {}^{5}/_{4} = {}^{125}/_{64}$, was von der Octave verschieden ist. Macht man also die 3 Terzen c—e, e—gis, gis—his rein, so wird die Octave unrein und umgekehrt. In der natürlich reinen Stimmung müßte c_1 als dritte Terz von c ein anderer Ton sein wie als Octave von c. — In der chromatischen Tonleiter kommt man durch 12 Quinten auf die 7te Octave des Grundtones; geht man aber 12 reine Quinten zu $^{3}/_{2}$ weiter, so entsteht das Intervall $({}^{3}/_{2})^{12} =$ ca 130, welches nicht = 7 Octaven ist; denn durch 7 Octaven entsteht das Intervall $2^7 = 128$. Werden also auf einem Klavier die Quinten rein gestimmt, so werden die Octaven unrein und umgekehrt. — Nach der sogenannten Pythagoräischen Stimmung entsteht immer ein folgender Ton der dur-Tonleiter, wenn man von dem vorhergehenden Tone um 2 Quinten hinauf und dann 1 Octave herabgeht; dieses trifft zu für die Secunde, denn $1 \cdot {}^{3}/_{2} \cdot {}^{3}/_{2} = {}^{9}/_{4} = 2 \cdot {}^{9}/_{8}$, aber nicht für die Terz, weil $^{9}/_{8} \cdot {}^{3}/_{2} \cdot {}^{3}/_{2} : 2 = {}^{81}/_{64}$, aber nicht $= {}^{5}/_{4}$. Stimmt man also die Tonleiter nach Quinten und Octaven, so werden die anderen Intervalle unrein.

Sollten alle Intervalle aller Tonarten vollkommen rein sein, so müßten, wie diese Beispiele zeigen, in jeder Tonleiter viel mehr als 12 Töne vorkommen. Instrumente, welche alle diese Töne enthalten, geben die wohlklingendsten Accorde, wie z. B. eine von Helmholtz construirte Physharmonica, Appunns Harmonium mit natürlich reiner Stimmung, Pooles Orgel. Die reinen Accorde solcher Instrumente haben nach Helmholtz „einen sehr vollen und gleichsam gesättigten Wohlklang"; die Accorde gewöhnlicher Instrumente klingen daneben „rauh, trübe, zitternd

und unruhig.“ Da indessen auf den meisten Instrumenten unmöglich mehr als 12 Töne in einer Octave angebracht werden können, so muß man doch bei der chromatischen Tonleiter bleiben und innerhalb derselben den einzelnen Tönen eine solche Höhe geben, daß die Fehler möglichst klein werden. Die Veränderung, welche an den 12 Tönen einer Octave vorgenommen werden muß, um die Intervalle möglichst rein zu erhalten, nennt man die **Temperatur**. Werden einzelne Intervalle vollkommen rein gemacht und die Fehler auf die übrigen vertheilt, so hat man die ungleichschwebende Temperatur. Eine solche ist Kirnbergers Temperatur, in welcher von den 12 Quinten 9 natürlich rein sind. In der heutigen Musik ist allgemein die gleichschwebende Temperatur eingeführt, bei welcher sämmtliche Octaven rein und die 12 Töne einer Octave ganz gleiche Intervalle mit einander bilden. Es sei dieses Intervall $= x$, so muß $x^{12} = 2$, also $x = \sqrt[12]{2} = 1{,}05946$ sein. Dieser halbe Ton der gleichschwebenden Temperatur ist kleiner als der große halbe Ton $^{16}/_{15} = 1{,}06666$ und größer wie der kleine halbe Ton $^{25}/_{24} = 1{,}04166$. Zwei dieser halben Töne geben die gleichschwebende Secunde $= \sqrt[12]{2^2} = 1{,}12246$, während die reine große Secunde $^9/_8 = 1{,}125$ beträgt. Die temperirte große Terz ist $\sqrt[12]{2^4} = 1{,}25992$, die reine $^5/_4 = 1{,}25$; die temperirte Quarte $= \sqrt[12]{2^5} = 1{,}33484$, die reine $= {}^4/_3 = 1{,}3333\ldots$; die temperirte Quinte ist $\sqrt[12]{2^7} = 1{,}49831$, die reine $^3/_2 = 1{,}5$; die temperirte Sexte und Septime sind 1,68179 und 1,88775, die reinen Intervalle sind 1,66666 und 1,875; aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß die temperirten Intervalle sich nur wenig von den reinen unterscheiden.

Wenn nun auch die gleichschwebende Temperatur den Vorzug hat, mit einer möglichst geringen Zahl von Tönen eine möglichst große Zahl von Tonarten von ziemlich gleichem Wohlklange darzubieten, so hat sie doch auch den Nachtheil, daß kein Accord gleichschwebend gestimmter Instrumente, wie z. B. der Klaviere, vollkommen rein ist; da nun die musikalische Bildung ihre Grundlage in dem Klavier hat, so werden auch von Sängern und Instrumentalisten meistens die gleichschwebenden Intervalle angegeben. Nur Streichquartettspieler, die sich vollkommen von den Schulregeln emancipirt und ein feines Gehör haben, sowie Quartettsänger, die viel ohne Klavier singen, finden wieder von selbst den Wohlklang der natürlich reinen Stimmung und erzielen damit die höchste Wirkung.

Jedoch haben neuere Versuche von Cornu und Mercadier (1869 u. 71) ergeben, daß sowohl gute, wie auch bedeutende Künstler nur in der Harmonie die natürlich reine Stimmung, in der Melodie dagegen die Pythagoräische Stimmung anwenden. Dieselbe wurde schon in 241. characterisirt; wie dort gezeigt wurde, ist in dieser Stimmung die Terz $^{81}/_{64}$ vom Grundtone, also $^9/_8$ von der Secunde; ebenso ist durch weitere Verfolgung des Verfahrens leicht zu ersehen, daß in dieser Stimmung überhaupt nur große ganze Töne vorkommen, daß also die Sexte $^{27}/_{16}$ und die Septime $^{243}/_{128}$ vom Grundtone ist. Bei den ersten Versuchen wandten die beiden Forscher einen parabolischen Phonautograph an, durch welchen sie die Wellen der Intervalle aufzeichnen ließen; bei späteren Versuchen setzten sie dünne Messingplatten in die Instrumente ein, welche durch einen langen Stahldraht die Schwingungen auf ein Vibrograph übertrugen. Nach diesen Versuchen würden die ganzen Töne in der Melodie sich von denen in der Harmonie um das Komma unterscheiden. Dieser Unterschied ist durchaus nicht unmerklich, denn schon Aug. Seebeck hat gezeigt, daß geübte Ohren zwei Stimmgabeltöne von 1209 und 1210 Schwingungen, die sich nur um $^1/_{18}$ Komma unterscheiden, selbst nach einander in der Tonhöhe zu erkennen vermögen.

Die Schwingungszahlen der musikalischen Töne. Nach der Feststellung der Schwingungszahlenverhältnisse der Intervalle in den verschiedenen Temperaturen ist es leicht, die Schwingungszahlen der musikalischen Töne zu berechnen, so wie man nur einen Ton der ganzen Tonreihe kennt. Es ist gebräuchlich, a_1, den sogenannten Kammerton, hier ebenso, wie beim Stimmen zu Grunde zu legen und die Höhe von a_1 durch Stimmgabeln zu bestimmen; doch stimmen die Schwingungszahlen der a_1-Stimmgabeln sehr häufig nicht überein; im Laufe der Zeiten sowohl hat sich die Höhe der Stimmung öfters verändert (z. B. in Glucks Opern sind dem Baß und dem Bariton häufig die eingestrichenen g und a vorgeschrieben), 242

als auch an verschiedenen Orten zu ein und derselben Zeit sehr verschiedene Kammertöne an den Orchestern herrschten. In Frankreich wurde endlich (1859) festgestellt, daß der Kammerton a_1 bei den staatlichen Orchestern 435 Schwingungen betragen solle; 440 Schwingungen für a_1 waren schon von Scheibler auf der Naturforscherversammlung in Stuttgart 1834 vorgeschlagen und vielfach auch in die akustischen Instrumente eingeführt worden; doch besteht auch noch häufig in diesen eine Stimmung, in welcher c ganze Potenzen von 2 als Schwingungszahl besitzt, wo also $c_{-3} = 16$ und $c_1 = 256$. Wenn a_1 dagegen $= 440$, so hat das natürlich reine $c_1 = 440 : {}^5/_3 = 264$ und $c_{-3} = 264 : 2 : 2 : 2 : 2 = 16{,}5$ Schwingungen. Für $a_1 = 435$ ergibt sich $c_1 = 435 : {}^5/_3 = 261$, $c = 261 : 2 = 130{,}5$, $c_{-1} = 65{,}25$, $c_{-2} = 32{,}6$, $c_{-3} = 16{,}3$; ebenso $c_2 = 261 . 2 = 522$, $c_3 = 1044$, $c_4 = 2088$ Durch Multiplication mit den bekannten Verhältnißzahlen der natürlich reinen Intervalle erhält man leicht folgende Tabelle für die c-dur Tonleiter nach der neuen französischen Stimmung.

Natürlich reine Stimmung.

Noten	Subcontra-Octave	Contra-Octave	Große Octave	Kleine Octave	Eingestrichene Octave	Zweigestrichene Octave	Dreigestrichene Octave	Viergestrichene Octave
	c_{-3}—h_{-3}	c_{-2}—h_{-2}	c_{-1}—h_{-1}	c—h	c_1—h_1	c_2—h_2	c_3—h_3	c_4—h_4
c	16,31	32,62	65,25	130,5	261	522	1044	2088
d	18,35	36,7	73,4	146,8	293,6	587	1174	2349
e	20,4	40,78	81,56	163	326	652,5	1305	2610
f	21,7	43,5	87	174	348	696	1392	2784
g	24,4	48,9	97,9	195,7	391,5	783	1566	3132
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,6	61,2	122,5	245	489	979	1957	3915

Dividirt man 435 durch die Zahl der temperirten Sexte 1,68179, so erhält man für das temperirte $c_1 = 258{,}65$ Schwingungen; durch Multiplication mit den oben angegebenen Zahlen der temperirten Intervalle erhält man folgende Tabelle für die c-dur-Tonleiter.

Temperirte Stimmung.

	—3	—2	—1	0	1	2	3	4
c	16,16	32,33	64,66	129,32	258,65	517,3	1034,6	2069,2
d	18,15	36,29	72,58	145,16	290,32	580,65	1161,2	2322,6
e	20,37	40,73	81,47	162,94	325,88	651,76	1303,5	2607
f	21,58	43,16	86,32	172,63	345,26	690,52	1381	2762
g	24,22	48,44	96,88	193,77	387,54	775,1	1550	3100
a	27,2	54,4	108,7	217,5	435	870	1740	3480
h	30,5	61	122,1	244,2	488,2	976,4	1953	3906

Kennt man die Schwingungszahl n eines Tones und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c des Schalles, so läßt sich nach der bekannten Formel (25) $l = c : n$ die Wellenlänge des Tones berechnen. Wird die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft $= 333^m$ gesetzt, so sind die Längen der Tonwellen in der Luft $= 333 : n$ in Metern. Besonders einfach gestaltet sich diese Rechnung für die Potenzenstimmung, wenn man die Geschwindigkeit des Schalles $= 1024'$ Par. setzt, also $= 2^{10}$; denn hier ist die Schwingungszahl n von c oder $c_0 = 128 = 2^7$, also die Wellenlänge von $c = 2^{10} : 2^7 = 2^3 = 8'$. Ebenso ist für jedes andere c oder c_x die Wellenlänge $l_x = 2^{3-x}$; also für $c_1 = 4'$, für $c_2 = 2'$, für $c_3 = 1'$, für $c_4 = {}^1/_2{}'$, für $c^5 = {}^1/_4{}'$; dagegen für $c_{-1} = 2^4 = 16'$, für $c_{-2} = 32'$, für $c_{-3} = 64'$. In der Potenzenstimmung gelten überhaupt für den Grundton c_x folgende einfache

Beziehungen: Schwingungszahl $n_x = 2^{x+7}$, Wellenlänge $l_x = 2^{3-x}$, Länge der offenen Pfeife 2^{2-x}, Länge der gedeckten Pfeife 2^{1-x}; die beiden letzteren Dimensionen werden in 250. und 251. verständlich werden.

243 Aufg. 371. Eine Sirene mit 12 Löchern macht per Min. 2200 Touren; welchen Ton gibt sie? Aufl.: $a_1 = 400$. — A. 372. Welches sind die Wellenlängen des tiefsten (nach Helmholtz 40) und des höchsten musikalischen Tones in der Luft? Aufl.: 8,325^m und 66,6^{mm}. — A. 373. Welches ist die Wellenlänge des tiefsten Tones einer Baßstimme $c_{-1} = 64$? Aufl.: 5,2^m. — A. 374. Wenn die Wellenlänge eines höchsten Zirpentones 10^{mm} betrüge, welches wäre dann die Schwingungszahl? Aufl.: 33300. — Aufl. 375. Wie groß ist die Schwingungszeit eines Bockkäfertones von 5^{mm} Wellenlänge. Aufl.: $^1/_{66600}$ Sec. — A. 376. Welches sind die harmonischen Obertöne des tiefsten musikalischen Tones? Aufl.: 80, 120, 160, 200, 240 . . . . Schw. — A. 377. Welches ist der 10te harm. O.-T. des tiefsten Baßtones? Aufl.: $e_2 = 640$ Schw. — A. 378. Welcher Oberton ist e_4? Aufl.: Der 40ste. — A. 379. Welcher O.-T. ist dies von dem höchsten Baßtone e_1? Aufl.: Der 8te. — A. 380. Welches sind der 7te, 9te und 10te O.-T. von e_1? Aufl.: d_4, fis_4, gis_4. — A. 381. Wie wirken dieselben aufeinander? Antw.: Sie dissoniren scharf. — A. 382. Wie heißen die 11 ersten O.-T. von g? Antw.: g_1, d_2, g_2, h_2, d_3, f_3, g_3, a_3, h_3, cis_4, d_4. — A. 383. Wie heißen dieselben von a, es, d_1, as_2, b_3? — A. 384. Wie steht die natürlich reine kleine Septime $^9/_5$ zur großen Sexte der natürlich reinen und der Pythagoräischen Stimmung? Aufl.: $^{27}/_{25}$ und $^{16}/_{15}$. — A. 385. Welches sind die Schwingungszahlen der dur-Tonleiter von $c_1 = 256$? Aufl.: $d_1 = 288$, $e_1 = 320$, $f_1 = 341^1/_3$, $g_1 = 384$, $a_1 = 426^2/_3$, $h_1 = 480$. (Zu vergleichen mit den Tabellen in 242.) — A. 386. Die Zahlen der dur-Tonleiter von $a_1 = 435$ und $= 440$ Schw. zu vergleichen? — A. 387. Die Zahlen derselben Tonleiter für die temperirte Stimmung zu berechnen und mit den Resultaten von 386 für die natürliche Stimmung zu vergleichen. — A. 388. Wie viel Schwingungen hat die natürliche und wie viel die temperirte Secunde von $c_2 = 512$? Aufl.: 576 und 574,7. — A. 389. Welcher Unterschied besteht zwischen der reinen und der temperirten Quinte von $g_1 = 387{,}54$? Aufl.: 0,66 Schw. — A. 390. Tabellen für die musikalischen Töne (ähnlich 242.) in der natürlichen und in der temperirten Stimmung zu berechnen, mit Grundlegung von Scheiblers $a_1 = 440$ und der Potenzenstimmung $c_{-3} = 16$. — A. 391. Wie viel Schw. vollbringen der große und der kleine ganze, sowie der große und der kleine halbe Ton von $d = 145{,}16$? Aufl.: 163,3, 161,3, 154,8, 151,2. — A. 392. Welcher Ton macht 60mal so viel Schw. als c_{-2}, 20mal so viel als d, 24mal so viel als a_{-1}, 18mal so viel als c_{-2}, 10mal so viel als g_1? Antw.: h_2, fis_4, e_4, d_2, h_4. — A. 393. Um wie viel unterscheidet sich der 6te Oberton des $c = 256$ von dem b_2? Aufl.: Um 28 Schw. — A. 394. Welche Töne machen 2, 3, 4, 5, 6mal weniger Schw. als c_2? Antw.: c_1, f, c, as_{-1}, f_{-1}. — A. 395. Wie viel Schw. vollbringt cis_2 als reine Terz von a_1, als kleine Secunde von c_2 und als des_2? Antw.: $543^3/_4$, $558^4/_5$, $550^5/_{16}$. — A. 396. Wie viel Schw. kämen dem as_1 zu als Erniedrigung von a_1 um ½ Ton, als Erhöhung von g_1 um ½ Ton, als große Terz von e_1, als kleine Terz von f_1, als kleine Sexte von c_1? Aufl.: $420^5/_{16}$, 417,6, 417,5, 417,6, 417,6. — A. 397. Wie viele temperirte Halbtöne liegen zwischen 300 und 500 Schw.? Aufl.: $300 . 1{,}05946^x = 500$; hieraus $x = 8{,}8$. — A. 398. Drei Octaven mit $3 . 12 = 36$ Halbtönen der chromatischen Tonleiter sind $=$ 4 Sexten $= 4 . 9 = 36$; stimmt dies zu den natürlich reinen Intervallen? Aufl.: Nein; denn 3 Octaven $= 2^3 = 8$; 4 Sexten aber $= (^5/_3)^4 = 7^{58}/_{81}$. — A. 399. Wie viele reine Quarten liegen zwischen 500 und 3000 Schw.? Aufl.: $500 . (^4/_3)^x = 3000$; daher $x =$ 6,2. — A. 400. Welcher Ton hat eine Wellenlänge von 1^{dm}? Aufl.: Nach Fl. (25) ist $1 = 3330 : x$, woraus $x = 3330$ Schw. $= gis^4$. — A. 401. Für welchen Ton ist die Wellenlänge $= 1^m$? Aufl.: Ein Ton zwischen e_1 und f_1.

2. Die Entstehung des Schalles.

244 **Eintheilung der Tonerreger.** Als Tonerreger werden solche elastische Körper benutzt, die sich leicht in Schwingungen versetzen lassen; da die flüssigen Körper durch eine Zugkraft zersplittern und durch gewöhnliche Druckkräfte nur eine sehr geringe Veränderung erfahren, so werden sie nicht als Tonerreger gebraucht, obwohl sie durch künstliche Vorrichtungen ebenfalls zum Tönen gebracht werden können. Zur Erzeugung der Töne benutzt man daher nur luftförmige und feste Körper und zwar solche, bei denen eine oder zwei Dimensionen ganz klein sind, wie Luft=

säulen, Stäbe, Drähte, Platten, weil dieselben sich leichter als Ganzes zum Schwingen bringen lassen. Die festen Tonerreger kann man nach dem Vorwalten von einer oder zwei Dimensionen in linienförmige und flächenförmige eintheilen; die linienförmigen zerfallen in biegsame oder Saiten und in starre oder Stäbe, ebenso die flächenförmigen in biegsame oder Membrane und in starre oder Scheiben. Die Schwingungen derselben können sowohl transversal wie auch longitudinal, in manchen Fällen auch drehend sein. Transversale Schwingungen entstehen, wenn man die Tonerreger senkrecht zu ihren Hauptdimensionen zupft, streicht, schlägt oder stößt und sie dadurch aus ihrer Gleichgewichtslage bringt, wonach sie wieder in dieselbe zurückkehren und nach dem Gesetze der Trägheit über dieselbe hinausgehen. Longitudinale Schwingungen entstehen, wenn man die Tonerreger in ihrer Hauptrichtung reibt, streicht, stößt oder schlägt; die drehenden Schwingungen werden durch drehende Reibung hervorgebracht. Jede an irgend einer Stelle hervorgebrachte Schwingungsbewegung pflanzt sich durch den ganzen Tonerreger fort, wird an den Grenzen desselben reflectirt, und interferirt mit den ursprünglichen Schwingungen zu stehenden Wellen. Die Töne entstehen demnach durch stehende Schwingungen der Tonerreger.

245 **Transversale Schwingungen der Saiten** (Mersenne 1630; Euler 1748). Wenn Saiten schwingen sollen, so müssen sie gespannt sein; dies geschieht entweder durch Befestigung an dem einen Ende und durch Aufwinden mittels eines Wirbels an dem anderen Ende, oder durch Anhängen von Gewichten. In dem letzten Falle gibt die Größe des Gewichtes (nach Axiom 5) zugleich die Größe der Spannung an. Die wichtigste Frage bei Saitenschwingungen ist der Zusammenhang der Schwingungszeit oder der Schwingungszahl mit den Dimensionen und der Spannung der Saite; darüber besteht folgendes Gesetz: Die Schwingungszahl einer Saite steht in umgekehrtem Verhältnisse mit der Länge und der Dicke, sowie mit der Wurzel aus dem specifischen Gewichte der Saite, dagegen in geradem Verhältnisse mit der Wurzel aus der Spannung.

Beweis. Schwingt eine Saite von der Länge l als Ganzes, als eine einzige stehende Welle, so muß diese als die Folge einer fortschreitenden Welle von doppelter Länge $2l$ angesehen werden; folglich ergibt sich nach Fl. (29) für die Schwingungszeit T die Fl. $T = 2l\sqrt{(d:e)}$. Hierin bedeutet d die Dichte oder Masse der Volumeneinheit, welche nach 19. bekanntlich $= s:g$, gleich dem sp. Gew. der Saite dividirt durch die Acceleration g. Die Elasticität der Saite wird durch ihre Spannung p ersetzt; da aber der Elasticitätsmodul e sich auf die Einheit des Querschnittes bezieht und dem Querschnitte umgekehrt proportional ist (65.), so ist statt e offenbar $p:q$ zu setzen. Wenn man in der Formel für T die beiden Substitutionen für d und für e vornimmt, so ergibt sich $T = 2l\sqrt{(s:g):(p:q)} = 2l\sqrt{(qs:pg)}$. Bedenkt man sodann, daß die Schwingungszahl $n = 1:T$, so erhält man die Formeln:

$$T = 2l\sqrt{\frac{qs}{pg}} \text{ und } n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{pg}{qs}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (33)$$

In der letzten Formel ist das Gesetz enthalten, da die Wurzel aus dem Querschnitte der Dicke proportional ist.

Nachweis. Am einfachsten geschieht der Nachweis durch das Monochord; dasselbe ist ein Kasten von trockenem Holze, auf den eine oder mehrere Saiten gespannt und durch verschiebbare Stege verlängert oder verkürzt werden können; an einer Skala unter der Saite kann man die Längen genau ablesen. Macht man durch Verschiebung des Steges die Saite 2, 3, 4, 5 .... mal kürzer, so erhält man die Octave, die Quinte der Octave, die Doppeloctave, die Terz der Doppeloctave u. s. w., kurz die harmonischen Obertöne, welche bekanntlich 2, 3, 4, 5 mal so viel Schwingungen machen als der Grundton. Macht man das an der Saite hängende Gewicht 4, 9, 16 ... mal so groß, so erhält man dieselben Obertöne. Zieht man eine Saite von 2 oder dreifacher Dicke von demselben Stoffe auf und hängt immer dasselbe Gewicht daran, so erhält man die tiefere Octave oder die Quarte der tieferen Doppeloctave. Vergleicht man eine Stahlsaite mit einer gleich dicken, gleich langen und gleich stark gespannten Darmsaite, so findet man, daß die erstere weniger

Schwingungen vollbringt als die letztere, und daß der Unterschied der Wurzel aus dem spec. G. gemäß ist. Alle diese Verhältnisse benutzt man in der Musik. Bei der Violine (g_1, d_1, a_1, e_2), der Viola oder Bratsche (c, g, d_1, a_1), dem Violoncell (c_{-1}, g_{-1}, d, a), dem Contrabaß (e_{-2}, a_{-2}, d_{-1}, g_{-1}), der Guitarre (g_{-1}, a_{-1}, d, g, h, e_1), der Zither, der Harfe, der Laute, dem Hackbrett und dem Klavier werden die Saiten für die höheren Töne kurz, dünn und leicht, die für die tiefen lang und dick genommen und durch Ueberspinnen mit Stahldraht schwer gemacht; durch stärkeres Spannen werden die Töne erhöht. Die letzteren Instrumente haben für jeden Ton eine oder mehrere Saiten; bei den ersteren, die nur aus wenigen Saiten bestehen, werden die höheren Töne dadurch erzeugt, daß man durch Andrücken der Saite gegen das Griffbrett den schwingenden Theil derselben verkürzt. — Nachdem das Gesetz über die Saitenlängen festgestellt ist, kann man mittels desselben die Richtigkeit der Intervallzahlen zeigen; man macht auf dem Monochord durch Verschieben des Steges eine Saite $^9/_8$, $^5/_4$, $^4/_3$, $^3/_2$, $^5/_3$, $^{15}/_8$, 2mal kürzer, so erhält man die Töne der diatonischen, natürlich reinen Tonleiter; ebenso kann man den großen ganzen Ton $^{10}/_9$, die halben Töne $^{16}/_{15}$ und $^{25}/_{24}$, die kleine Terz $^6/_5$ und die kleine Sexte $^8/_5$ und andere Intervalle hörbar machen; besonders empfiehlt es sich, die harmonischen Obertöne des Grundtones einer tief gestimmten Saite zu Gehör zu bringen, indem man dieselbe durch einen Steg 2, 3, 4mal kürzer macht; man hört dann die erste Octave, die Quinte derselben, die zweite Octave, die Terz, Quinte und kleine Septime derselben, die dritte Octave, die Secunde, Terz .... derselben.

Die angegebene Formel gilt jedoch nur für absolut biegsame Saiten; da die wirklichen Saiten einige Steifigkeit besitzen, wodurch die Moleküle schon ohne besondere Saitenspannung einer gewissen Spannung unterliegen, so schwingen die wirklichen Saiten wie absolut biegsame von größerer Spannung; die theoretische Schwingungszahl n wird nach Seebeck (1847) durch diese Einflüsse übergeführt in die wirkliche n′

$$n' = n\,(1 + (r^2 : l))\sqrt{(e\pi : p)}$$

worin r den Radius, e den Elasticitätsmodul und p die Spannung der Saite ohne Rücksicht auf die Steifigkeit bedeutet. Aus dieser Formel ergibt sich, wie aus obiger Ueberlegung, daß die Schwingungszahl einer Saite durch ihre Steifigkeit erhöht wird, und zwar um so mehr, je dicker, je kürzer und je weniger gespannt dieselbe ist.

246 Eine Saite kann auch in 2, 3, 4 .... gleichen Theilen, also mit 1, 2, 3 .... Knoten schwingen. Dies findet statt, wenn man $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ .... derselben in Schwingung versetzt; denn alsdann erregt man fortschreitende Wellen, deren Längen $^2/_2$, $^2/_3$, $^2/_4$ .... von der Saitenlänge sind, und diese fortschreitenden Wellen interferiren nach 227. mit den an den Saitengrenzen reflectirten Wellen zu stehenden Wellen von $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ .... der Saitenlänge; es entstehen also 2, 3, 4 .... stehende Wellen auf der Saite, von denen je zwei neben einander liegende in entgegengesetzten Phasen begriffen sind. Da diese Wellen 2, 3, 4... .mal kürzer sind als die stehende Welle einer ganzen Saite, so müssen sie auch 2, 3, 4....mal so viel Schwingungen enthalten, also die Octave, die Octavenquinte, die Doppeloctave...., kurz die harmonischen Obertöne ergeben.

Auch diese Erscheinungen sind leicht am Monochord nachzuweisen. Man setzt den Steg in $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ .... der Saite unter dieselbe und schlägt den einen Theil an, so hört man die harmonischen Obertöne; daß die anderen, nicht angeschlagenen Theile mitschwingen, zeigt man durch Reiter von Papier oder von leichtem Drahte. Hat man z. B. den Steg in $^1/_5$ der Saite untergesetzt, so bleiben die Reiter auf den Theilpunkten $^2/_5$, $^3/_5$, $^4/_5$ sitzen, springen aber von Stellen zwischen diesen Theilpunkten herab, wenn man das erste Fünftel anschlägt. Indessen ist es noch lehrreicher, den Steg wegzulassen, und den einen Theilpunkt nur leicht mit dem Finger oder mit einer Federfahne oder mit einem Pinsel zu berühren; die Obertöne erklingen dann viel weicher und metallischer, fast flötenartig, weßhalb man die so erregten Töne auch Flageolet-Töne nennt.

Sehr schön lassen sich diese Erscheinungen mit Meldes Stimmgabelapparat zeigen, der auch zum Nachweise des Hauptgesetzes und der Fl. (33) benutzt werden kann. Bekanntlich schwingt der Faden dieses Apparates (Fig. 126) nur dann als Ganzes, wenn er vermöge seiner Länge, Dicke, Spannung und Dichte gerade so viel Schwingungen macht, als die Gabel (oder halb soviel, wenn die Gabel in der Fadenrichtung schwingt). Kennt man nun die Schwingungszahl der Gabel, sowie die Dicke, die Spannung und das Gewicht des Fadens, so kann man die Länge desselben nach Fl. (33) berechnen; gibt man dem Faden durch Verschieben des Schlittens diese Länge, so schwingt er als luftiges Gewebe auf und ab, während er bei unrichtiger Länge nur zittert. Hiermit ist Fl. (33) und damit das

Hauptgesetz nachgewiesen; doch kann man auch die vier Theile desselben einzeln nachweisen. Bei drei Gabeln, deren Schwingungszahlen sich wie 1 : 2 : 3 verhalten, müssen die Fadenlängen in dem Verhältnisse 3 : 2 : 1 stehen. Macht eine Gabel doppelt so viel Schwingungen als eine andere, so muß man bei gleicher Fadenlänge an die letztere vier Fäden spannen, wie die erste nur einen trägt; hiermit ist der Einfluß der Wurzel aus dem Querschnitte gezeigt. Nimmt man aber an die langsamer schwingende Gabel nur einen Faden, so muß man an den Faden der schnelleren Gabel 4mal so viel Gewichte hängen als an den der langsameren, wodurch das Verhältniß der Schwingungszahl zu der Wurzel aus der Spannung zu Tage tritt. Hat man Drähte von verschiedenen Metallen an dieselbe Stimmgabel gespannt, so ergibt sich, daß bei gleicher Länge und Dicke die anzuhängenden Gewichte sich wie die spec. Gewichte der Drähte verhalten. Man kann umgekehrt hieraus das spec. Gewicht von Drähten und Fäden bestimmen. — Wenn man an einem Faden, der als Ganzes schwingt, die spannenden Gewichte 4, 9, 16 .... mal kleiner macht, so könnte derselbe nur als Ganzes schwingen, wenn er 2, 3, 4 .... mal kürzer gemacht würde, weil der Einfluß der Länge alsdann demjenigen der Wurzel aus der Spannung gleich, aber entgegengesetzt wäre; läßt man aber dem Faden seine Länge, so theilt er sich in 2, 3, 4 ... einzeln schwingende Theile mit 1, 2, 3 .... Knoten. Besonders prachtvoll sind diese Erscheinungen, wenn man statt des Fadens nach Young flachen polirten Silberdraht nimmt und diesen mit elektrischem Lichte beleuchtet, oder wenn man wie Tyndall einen durch einen elektrischen Strom glühend gemachten Platindraht verwendet.

Es wird später evident werden, daß eine Saite (wie auch die meisten anderen Tonerreger) nie ausschließlich als Ganzes schwingt, sondern gleichzeitig auch in gleichen Theilen, daß also auch der Grundton nie allein auftritt, sondern nur in Mischung mit Obertönen, die allerdings ihrer Schwäche wegen für das gewöhnliche Ohr unmerklich sind.

247 **Transversale Schwingungen der Stäbe.** (Dan. Bernoulli 1753; Chladni 1796). Stäbe schwingen, ohne gespannt oder belastet zu sein, durch ihre Elasticität; sie bedürfen nur einer festen Lage. Die Schwingungen geschehen nach folgendem Gesetze: die Schwingungszahl eines Stabes ist unabhängig von seiner Breite, aber direct proportional der Dicke und der Wurzel aus dem Elasticitätsmodul, und umgekehrt proportional dem Quadrat der Länge und der Wurzel aus dem specifischen Gewichte.

Beweis. Die Länge, Breite und Dicke seien bezüglich mit l, b und h, der Elasticitätsmodul mit e und die den Stab biegende Kraft mit p bezeichnet, so ist nach 67. die Größe der Biegung $pl^3 : ebh^3$; ist diese Biegung $= 1$, so ergibt sich die hierzu nöthige Kraft $p = ebh^3 : l^3$. Diese Kraft wirkt auf die ganze Masse $m = bhls : g$ des Stabes; daher ist unsere auf die Einheit der Masse wirkende Kraft $k = (ebh^3 : l^3) : (bhls : g) = geh^2 : l^4 s$. Setzen wir diesen Werth in unsere Formel (27) für die Schwingungszeit, $T = 2\pi : \sqrt{k}$ ein und suchen wir hieraus nach der Formel $n = 1 : T$ die Schwingungszahl n, so erhalten wir

$$T = C \cdot \frac{l^2}{h} \sqrt{\frac{s}{eg}} \text{ und } n = A \cdot \frac{h}{l^2} \sqrt{\frac{eg}{s}} \;\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (34)$$

In diesen Formeln, mit welchen das Gesetz über die Schwingungen der Stäbe bewiesen ist, bedeuten C und A zwei constante Größen, in denen die Größe 2π steckt, und die nach der Befestigungsweise der Stäbe einen verschiedenen Werth haben. So ist für einen cylindrischen Stab, der am einen Ende festgeklemmt ist, $A = 0{,}28$; wenn er an beiden Enden fest geklemmt oder an beiden Enden frei ist, $A = 1{,}78$; wenn das eine Ende aufgelegt ist, $A = 1{,}23$; wenn beide Enden aufgelegt sind, $A = 0{,}785$. Hieraus geht hervor, daß ein und derselbe Stab bei verschiedener Befestigungsart sehr verschiedene Schwingungszahlen, also auch verschiedene Töne erzeugt; bei der zweiten Befestigungsart ist der Ton nahezu die dritte Octave des Tones für die erste Befestigungsart, bei der dritten Art nahezu die Quinte der Doppeloctave, bei der vierten die Quarte der Octave.

Da die Schwingungszahlen hier mit den Quadraten der Länge und nicht mit der Länge selbst in umgekehrtem Verhältnisse stehen, so nimmt die Tonhöhe der Stäbe rasch zu, wenn die Länge derselben nur wenig abnimmt. Instrumente wie z. B. die Spieldose, die Strohfiedel, der Schellenbaum, deren Töne durch Stäbe erzeugt werden, bedürfen demnach nur geringer Längen im Verhältnisse zu den Saiteninstrumenten. — Die Stäbe schwingen ebenfalls nicht nur als Ganzes, sondern auch in einzelnen durch Knoten getrennten Theilen, die aber nicht einander gleich sind. Nur in dem Falle, daß ein Stab an beiden Enden angestemmt ist, sind die Theile einander gleich; daher verhalten sich die Schwingungszahlen eines solchen Stabes, wenn er mit 0, 1, 2, 3 .... Knoten schwingt, wie 1 : 4 : 9 : 16 .... — Für die erste Befestigungsart dagegen ist das Endglied des frei

mit Knoten schwingenden Stabes kleiner als die Innenglieder, und auch diese sind nicht genau einander gleich: die Schwingungszahlen eines mit 0, 1, 2, 3 .... Knoten schwingenden Stabes verhalten sich dann annähernd wie 1 : 9 : 25 : 49 : 81. Die Schwingungsformen eines solchen Stabes sind sehr mannichfaltig und lassen sich leicht an Wheatstones Kaleidophon (1827) beobachten, in welchem der schwingende Stab eine versilberte Glaskugel trägt, auf die man ein helles Licht fallen läßt. — Mit einem solchen frei schwingenden Stabe z. B. einer Stricknadel läßt sich das Gesetz der Längen durch das Auge beobachten; macht z. B. der Stab bei einer gewissen Länge 1 Schw. in 1 Sec., so vollzieht er 4, 9, 16 Schw., wenn man ihn 2, 3, 4 mal kürzer macht; läßt man ihn noch kürzer schwingen, so kann man (nach Chladnis Vorgang 1787) leicht die Schwingungszahlen der entstehenden Töne berechnen. — Die einerseits freien Stäbe finden Verwendung in der Zungenpfeife, in der Eisenvioline, der Spielbose und Drehorgel. — Ist der Stab an beiden Enden frei oder fest, so schwingt er mit 2, 3, 4 .... Knoten, und die Schwingungszahlen verhalten sich wie 9 : 25 : 49 ..., ergeben also unharmonische Töne; im ersten Falle liegen die zwei Knoten etwas weniger als 1/4 der Stablänge von den Enden entfernt. In der Strohfiedel, dem Holzinstrument, der Glasstabharmonika und dem Metallophon werden daher die Holz-, Glas- oder Metallstäbe an diesen Punkten auf Strohbündel gelegt, auf Schnüre gefaßt oder mit einer anderen weichen Unterlage versehen. Die Knoten solcher Stäbe lassen sich sichtbar machen, wenn man feinen Sand auf die Stäbe streut; derselbe rollt von den heftig bewegten Bäuchen nach den Knoten hin und bleibt dort ruhig liegen. — Wird ein an beiden Enden freier Stab gebogen, so rücken die beiden Knoten einander immer näher; ist er in die Form einer Gabel gebogen, so liegen die Knoten sehr nahe an den beiden Kniestellen. Die beiden Zinken einer Stimmgabel schwingen daher gleichzeitig nach innen, wenn die Biegung nach unten schwingt, und umgekehrt. Uebrigens schwingt auch eine Stimmgabel mit mehr als zwei Knoten; der tiefste der hierdurch noch entstehenden Töne macht 5—6 mal soviel Schwingungen als der Eigenton der Gabel; die Schwingungszahlen der höheren Töne stehen zu diesem Tone im Verhältnisse von 9 : 25 : 49 : 81 ..., so daß die Höhe dieser Töne sehr schnell wächst. Da indeß diese hohen Töne rasch verklingen, so entwickelt eine Stimmgabel bei längerem Tönen fast nur ihren Grundton. (Chladni 1802).

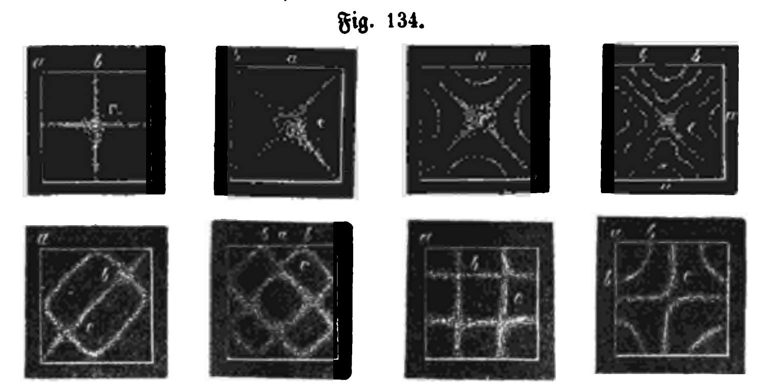
Transversale Schwingungen der Platten und Membrane, Chladnis Klangfiguren (1787). Platten werden in Schwingungen versetzt, indem man sie an einem Punkte festklemmt und am Rande mit einem Violinbogen anstreicht. Sie schwingen aber dann niemals als Ganzes, sondern in einzelnen Theilen, die durch ruhende Stellen, Knotenlinien genannt, von einander getrennt sind und sich in entgegengesetzten Phasen befinden. Da die Platten als Verbindungen von Stäben anzusehen sind, so ergibt sich für dieselben das Gesetz: die Schwingungszahl ist direct proportional der Dicke und der Quadratwurzel aus dem Elasticitätsmodul, dagegen umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus dem specifischen Gewichte und dem Quadrat des Durchmessers der Platte; außerdem wird dieselbe um so größer, in je mehr Theilen die Platte schwingt, je mehr Knotenlinien also vorhanden sind. 248

Die Zahl der Knotenlinien richtet sich nach der Art der Festklemmung und nach dem Verhältnisse der festgeklemmten Punkte zu der angestrichenen Stelle. Da dieses Verhältniß in vielfacher Weise verändert werden kann, so ist auch eine Platte zu zahlreichen verschiedenen Schwingungszahlen, also zu vielen Tönen befähigt. Von diesen Tönen erklingen beim Anstreichen oder beim Schlagen immer alle, für welche die angestrichene Stelle kein Knotenpunkt ist; ein Ton erklingt stark, der Grundton, die anderen nur schwach, Nebentöne. Die Nebentöne, wie überhaupt die Töne einer Platte, sind meist unharmonisch zu einander.

Der letzte Theil des Gesetzes ist durch Chladnis Klangfiguren nachzuweisen. Auf eine festgeklemmte Glas-, Metall- oder Holzplatte von z. B. quadratischer oder Kreisform wird feiner, trockener Sand gestreut und die Platte dann gestrichen, während man irgend eine Stelle der Platte mit dem Finger berührt. Von den Bäuchen wird dann der Sand aufwärts geschleudert, rollt auf den unmerklichen schiefen Ebenen derselben an die Knotenlinien herab und häuft sich dort zu scharfen Streifen an, welche mit einander die von Chladni entdeckten Klangfiguren bilden. In den folgenden Figuren (134) ist immer die Berührungsstelle mit b, die Anstreichestelle mit a und die Einklemmstelle mit c bezeichnet. Nach

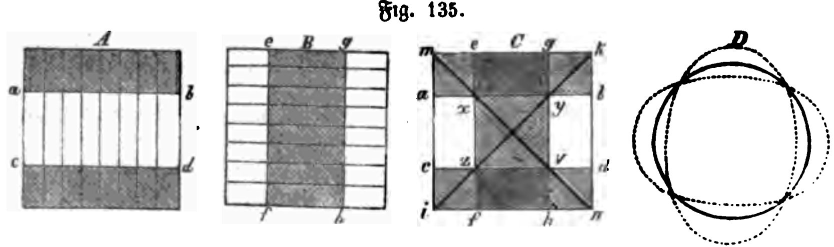
Strehlke bestehen alle Klangfiguren aus krummen Linien, hauptsächlich Hyperbeln; ein und derselbe Ton kann je nach der Einklemmung verschiedene Figuren erzeugen, verschiedene Töne haben aber nie gleiche, sondern um so verwickeltere Figuren, je höher sie sind.

Fig. 134.



Zur Erklärung der Klangfiguren nach Wheatstone (1833) hat man sich die z. B. quadratische Platte A (Fig. 135) aus vielen parallelen Stäben zusammengesetzt zu denken, deren Enden frei sind; solche Stäbe aber schwingen mit Knoten in einem Abstande von

Fig. 135.



ihrem Ende, etwa gleich ¼ ihrer Länge; alle diese Knoten bilden zusammen zwei Knotenlinien ab und cd, welche Bewegungen von entgegengesetzten Phasen von einander trennen. Dieselbe Platte kann man sich aber auch aus frei schwingenden Stäben von einer Richtung bestehend denken, die zu der eben betrachteten senkrecht steht, also wie in B; hierdurch erhält die Platte die Knotenlinien ef und gh, zu deren beiden Seiten wieder entgegengesetzte Bewegungen stattfinden, die mit denen der Platte A in gleicher oder entgegengesetzten Phase begriffen sind, wie in der Figur durch gleiche Schraffirung angedeutet wurde. Eine gewisse Platte muß nun sowohl in der Weise A, wie auch in der Weise B schwingen, weil für eine ausschließliche Bewegung der einen Art kein Grund vorhanden ist. Man hat sich also in einer Platte zwei (in anderen Fällen sogar vier) Töne von gleicher Höhe gleichzeitig existirend vorzustellen (Coexistenz gleicher Schwingungen). Demnach finden sich in einer tönenden Platte auch alle 4 Knotenlinien ab, cd, ef, gh. Wo diese Knotenlinien zusammentreffen, also (siehe Figur 135 C) in den Punkten x, y, v und z sind jedenfalls Ruhepunkte; in den Räumen aczx, bdvy, egyx, fhzv, wo gleiche Phasen auf einander treffen, kann sich keine Knotenlinie befinden; dagegen in den Räumen axem, bygk, dvhn, czfi, sowie in xyvz können ruhende Stellen vorkommen, weil hier entgegengesetzte Phasen auf einander treffen; und diese ruhenden Stellen müssen durch die Ruhepunkte x, y, v, z gehen, weil diese schon an sich in Ruhe sind; also müssen die Diagonalen mn und ik Knotenlinien sein. Diese Erklärungsweise der Klangfiguren, die Wheatstone auf viele Fälle ausgedehnt hat, ist zwar manchmal angezweifelt worden, hat aber durch neue Versuche von König in Paris (1862) ihre Bestätigung gefunden.

Besonders deutlich wird die auf der Superposition der Schwingungen beruhende Erklärung Wheatstones durch Melbes Wellenapparat (1874) (Fig. 136). Derselbe besteht aus den Theilen I und II; I ist ein Holzgestell, das oben eine aus Zinkblech gebildete Wellenfläche trägt, die etwas mehr als 2 Wellenlängen enthält und von der Vorder- und Hinterwand überragt wird; II enthält eine ganz gleiche Wellenfläche, jedoch gebildet aus den

Knöpfen von 17.33 Strichstöcken, die ebenso die ganze Wellenfläche erfüllen, wie es in der Fig. II nur in der vorderen und hinteren Reihe angedeutet ist. Setzt man mittels der Handhaben P und der Stifte xg den Theil II auf I unter 90° Drehung, so kann man durch die hervorragenden Stäbe die einfacheren Klangfiguren wahrnehmen. Auch die Interferenzgesetze von 226. lassen sich mittels dieses Apparates demonstriren.

Fig. 136.

Mischt man unter den Sand Bärlappsamen (semen lycopodii), so bilden sich an den heftigst bewegten Stellen einer Platte wirbelnde Staubwölkchen, Savarts Staubfiguren (1829); diese entstehen dadurch, daß an jenen Stellen die Luft fortgestoßen wird, daß also luftleere Räume entstehen, nach denen von den Knotenlinien her die Luft strömt und die leichten Staubtheilchen mitführt (Faraday 1831).

Die Glocken, welche als gekrümmte Platten anzusehen sind, schwingen ebenfalls nie als Ganzes, sondern, wenn sie ihren Grundton angeben, in vier gleichen Theilen, die durch Knotenlinien getrennt sind (Fig. 135 D). Diese ziehen von 4 diametralen Stellen des Randes nach dem Scheitel hin und können durch 4 diametral einander gegenüberhängende, die Glocke berührende Kügelchen sichtbar gemacht werden; von den Bäuchen springen dieselben lebhaft ab, an den Knoten sitzen sie ruhiger. Gießt man in eine Glasglocke Wasser und streicht den Rand mit einem Violinbogen, so geräth das Wasser an den Bäuchen in eine wirbelnde Bewegung, die sich nach den Knoten zu beruhigt; nimmt man statt Wasser Aether oder Alkohol, so reißen sich kugelige Tröpfchen los, die sich zu einem zierlichen Sterne gruppiren, dessen Strahlen nach dem Knoten gerichtet sind. Glocken können auch in 6, 8, 10, 12 Theilen schwingen und bilden dann Töne, die zu dem Grundtone nahezu in dem Verhältnisse 4 : 9 : 16 : 25 : 36 stehen. Der Grundton einer Glocke ist um so höher, je kleiner ihre Oberfläche und je größer ihre Dicke ist. Außer zum Läuten und Zeitanschlagen werden die Glocken musikalisch im Glockenspiele, im Schellenbaume und in der Glasharmonika (erfunden von Franklin 1763) verwendet; diese besteht aus einer Anzahl von Glasglocken, welche auf einer gemeinschaftlichen Welle sitzend sich mit dieser drehen und durch einen Druck mit dem benetzten Finger reine, weiche Töne erzeugen. — Die ebenen Platten haben eine solche Verwendung nur in dem Becken, sowie in dem King der Chinesen und in dem Gambang der Javaner, welche Instrumente aus 16 Stein-, Metall- und Holzplatten bestehen.

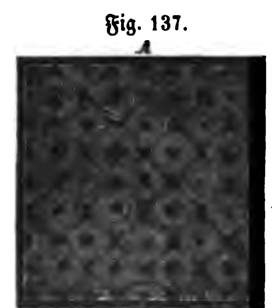
Die Membrane schwingen meist als Ganzes; aller auf ein Paukenfell gestreute Sand wird beim Anschlagen desselben an den Rand geschleudert; doch können sie auch wie die Platten in Theilen schwingen, geben aber hierdurch meist unharmonische Nebentöne. Der Ton einer Membran ist um so höher, je stärker gespannt und je dicker sie ist. Die zwei Pauken der Orchester werden von f_{-1} bis b_{-1} und von c bis f gestimmt, so daß ihre Töne immer um eine Quinte von einander abstehen.

Auch flüssige und Luftplatten sind hinsichtlich ihrer Schwingungen in neuerer Zeit der Betrachtung unterzogen worden. Flüssige Platten hat man allerdings nicht unabhängig, sondern durch eine feste Platte, auf welcher die Flüssigkeit ausgebreitet war, in Schwingungen versetzt. Faraday fand schon 1831, daß eine solche flüssige, schwingende Platte sich in Rippungen theile, deren Breite bei abnehmender Schwingungszahl abnehme, aber mit der Dicke der flüssigen Schicht zunehme. Schneebeli (1871) hat die Versuche in anderer Weise wiederholt und dabei die interessante Thatsache gefunden, daß die Breite der Rippungen von der Natur der Flüssigkeit abhänge. In der Reihe Schwefelkohlenstoff, Alkohol, Terpentinöl, Schwefelsäure, Ameisensäure, Wasser, Nelkenöl, Glycerin wird die Rippenbreite immer größer, was deßhalb eine besondere Aufmerksamkeit verdient, weil auch die Capillaritätsconstante (171.) in derselben Weise zunimmt. Berthelemy (1874) hat nicht dünne Platten, sondern dicke, in verschieden geformte Gefäße gegossene Massen in

Schwingungen versetzt, indem er auf das Gefäß eine schwere tönende Stimmgabel setzte; auch hier zeigten sich die Faltungen auf der Oberfläche der Flüssigkeiten, und nahm deren Entfernung von einander mit abnehmender Schwingungszahl zu, aber, entgegengesetzt wie bei den dünnen Platten, blieb sie unabhängig von der Natur oder der Dichte der Flüssigkeit.

Die Schwingungen der Luftplatten wurden von Kundt (1869 und 73) erforscht; auf den Rand einer Glasplatte wurden entweder kleine Korkstückchen oder ein ganzer Korkrahmen und hierauf eine zweite Glasplatte gelegt; in ersterem Falle bildete sich zwischen den Glasplatten eine offene, in letzterem eine geschlossene Luftplatte; dieselben wurden in Schwingungen versetzt mittels einer Glasröhre, die auf einer Oeffnung der oberen Platte befestigt und oben mit einem Kork verschlossen war; dieser Kork umfaßte eine zweite, engere Glasröhre, die sich halb inner- halb außerhalb der weiteren Röhre befand und an ihrem inneren Ende einen die weite Röhre nur leicht berührenden Korkkolben trug. Wurde der äußere Theil dieser Röhre gerieben, so pflanzten sich die entstehenden longitudinalen Schwingungen derselben durch den Korkkolben auf die Luft in der weiten Röhre und auf die Luftplatte fort. Die engere Glasröhre wurde auf einen der Töne der Luftplatte abgestimmt, indem man an ihrem oberen Ende so lange kleine Stückchen abbrach, bis die gleiche Stimmung erzielt war. Dies wurde dadurch erkannt, daß feines Korkfeilicht, welches man vorher auf die untere Glasplatte ausgebreitet hatte, sich in Klangfiguren ordnete. Eine der zahlreichen Staubfiguren, welche Kundt erhielt, ist in Fig. 137 abgebildet; dieselben unterscheiden sich wesentlich von Chladnis Klangfiguren; an den dunkeln Stellen bleibt nämlich der Staub in Ruhe liegen, sie sind Knoten und zwar Knotenpunkte, nicht Knotenlinien; die hellen Stellen dagegen bedeuten Rippungen, welche der Staub durch seine Bewegungen bildet, die auf den Richtungen der Rippungen senkrecht stehen; diese Stellen sind Bäuche. Hiernach sind die Schwingungen der Luftplatten eigentlich longitudinal, sie geschehen in den Richtungen der Platten. In jeder der gezeichneten Kreisrippungen bewegen sich die Lufttheilchen radial einwärts und auswärts; die Mittelpunkte dieser Kreise sind daher in Ruhe, und um sie wechselt bei jeder Schwingung eine Verdichtung mit einer Verdünnung; diese Ruhepunkte mit Dichtigkeitswechsel nennt Kundt (umschlossene) einfache Knoten. Leicht ist aus der Figur zu ersehen, daß zwischen je 4 Rippungen eine zweite Art von Ruhepunkten vorhanden ist; da nämlich in je zwei benachbarten stehenden Wellen entgegengesetzte Phasen stattfinden, so bewegen sich von 2 Kreisen her die Theilchen nach diesen Ruhepunkten hin, während in den 2 anderen Kreisen die Bewegung von den Ruhepunkten weg stattfindet. Kundt nennt diese Ruhepunkte ohne Dichtigkeitswechsel doppelte Knoten. Bei anderen Figuren treten auch nicht umschlossene einfache Knoten auf, in denen zwar Ruhe mit Dichtigkeitswechsel herrscht, aber ohne die entgegengesetzte Bewegung der Theilchen, die bei den umschlossenen einfachen Knoten vorhanden ist. Kundt hat auch die mathematische Theorie der schwingenden Luftplatten aufgestellt und aus derselben nicht blos die eben betrachteten Eigenthümlichkeiten der Schwingungsform, sondern auch die Gesetze der Schwingungszahl abgeleitet, welche durch die Versuche bestätigt werden; die Schwingungszahl ist hiernach unabhängig von der Dicke der Platte, ist bei geschlossenen Platten halb so groß als bei offenen; die wirkliche Schwingungszahl stimmt auch bei den geschlossenen Platten mit der theoretischen, bei den offenen aber nicht, was sich bei der Betrachtung der Pfeifen (251.) erklären wird.

Fig. 137.



249 **Longitudinale Schwingungen der Saiten und Stäbe** (Chladni 1796; Poisson 1816). Saiten werden in Längsschwingungen versetzt, indem man sie mit dem Violinbogen sehr schief streicht, oder indem man sie mit beharzten Fingern oder mit einem beharzten Tuch- oder Lederlappen der Länge nach rasch reibt; Glasstäbe und Glasröhren reibt man mit einem nassen Tuche, andere Stäbe ebenfalls mit beharztem Leder oder mit beharzten Fingern. Die entstehenden Töne sind meist sehr hoch und bis zur Unerträglichkeit stark und schrill, obwohl nur die Endflächen (nach Kundt 1865) der Luft die longitudinale Bewegung mittheilen. Die Bewegung solcher Saiten und Stäbe besteht aus stehenden Longitudinalwellen; dieselben unterscheiden sich von den fortschreitenden Longitudinalwellen dadurch, daß diese die abwechselnde größte Verdichtung und Verdünnung (nach 236.) an der

Stelle haben, wo die Theilchen die größte Schwingungsgeschwindigkeit besitzen, während die stehenden Längswellen die größte Verdichtung und Verdünnung an den Knoten, die natürliche Dichtigkeit aber an den Bäuchen erhalten; denn zu beiden Seiten eines Knotens bewegen sich (nach 227.) die Theilchen nach entgegengesetzten Richtungen, also entweder beiderseits nach den Knoten hin, wodurch Verdichtung entsteht, oder beiderseits von den Knoten weg, wodurch Verdünnung stattfindet. In dem Moment, wo an dem einen Knoten die stärkste Verdichtung geschieht, ist an dem benachbarten die stärkste Verdünnung, weil die Theilchen, die dem ersten Knoten zuströmen, sich von dem letzten entfernen. Nach der Mitte zwischen zwei Knoten, also nach dem Bauche hin, strömen folglich von dem einen Knoten her die Theilchen, während sie auf der anderen Seite von dem Bauche weg dem anderen Knoten zuströmen; hierdurch bleibt an den Bäuchen die natürliche Dichtigkeit erhalten. — **Die Schwingungszahl, also auch die Höhe eines Longitudinaltones ist unabhängig von der Spannung der Saite, sowie von der Dicke der Saite oder des Stabes, steht aber in umgekehrtem Verhältnisse zu der Länge und der Quadratwurzel aus dem spec. Gew. und in geradem Verhältnisse zu der Wurzel aus der Elasticität.**

Beweis. Ein Stab sei wie eine Saite beiderseits eingespannt und schwinge in seiner ganzen Länge l, als eine einzige stehende Welle; dieselbe geht hervor durch die Interferenz einer fortschreitenden Welle von der Länge $2l$; daher gilt hier die Formel (29), wenn wir in derselben $2l$ statt l setzen; also ist $T = 2l \sqrt{(d:e)}$; da die Theilchen eines durch eine reibende oder ziehende Kraft verlängerten Stabes durch ihre Elasticität wieder zurückkehren, so bleibt in dieser Formel e unverändert; d die Masse der Volumeinheit aber ist gleich dem Gewichte der Volumeinheit dividirt durch g, also $= s:g$, wenn s das spec. Gewicht bedeutet; folglich ist $T = 2l \sqrt{(s:eg)}$. Da nun $n = 1:T$ ist, so ergibt sich

$$n = (1:2l)\sqrt{(eg:s)} \quad \ldots \quad (35)$$

worin das angegebene Gesetz enthalten ist. Der Nachweis ist einfach zu führen: stark und schwach gespannte Saiten von derselben Länge geben denselben Längenton, ebenso dicke wie dünne Stäbe. Saiten und Stäbe von 2, 3, 4 . . mal kleinerer Länge, aber von demselben Stoffe geben die Obertöne des Tones, den ein Stab von einfacher Länge ergibt. Gleich lange Stäbe von verschiedenem Stoffe erzeugen verschiedene Töne, deren Höhe mit dem Quotienten $\sqrt{(eg:s)}$ oder was dasselbe ist, $\sqrt{(e:d)}$ im Verhältnisse steht. — Dieser Quotient ($\sqrt{e:d}$) oder $\sqrt{(eg:s)}$ drückt aber nach Formel (30) die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c der longitudinalen Wellen des Stabtones aus; setzen wir demnach statt $\sqrt{(eg:s)}$ in der Formel (35) die Geschwindigkeit c, so erhalten wir $n = c:2l$ oder $c = 2ln$. Indessen folgt diese wichtige Gleichung auch schon aus Formel (25); in dieser Formel $l = c:n$ bedeutet nämlich l die Länge der fortschreitenden Welle, welche bekanntlich doppelt so groß ist, als die Länge der aus ihr hervorgehenden stehenden Welle, also auch als die Länge l des als Ganzes schwingenden Stabes; setzt man daher dort $2l$ statt l, so entsteht $2l = c:n$, worin jetzt l die Länge des Stabes bedeutet; hieraus folgt abermals die Formel

$$c = 2ln \quad \ldots \quad (36)$$

Mittels dieser Formel läßt sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in einem Stabe berechnen, wenn man die Höhe des Longitudinaltones desselben kennt. Auch folgt aus derselben, daß **die Geschwindigkeit in verschiedenen Stäben von gleicher Länge sich wie die Schwingungszahl der Töne dieser Stäbe verhält, so wie daß in gleich hoch tönenden Stäben die Geschwindigkeit im geraden Verhältnisse zur Länge derselben steht.** — Beiderseits festgehaltene Stäbe können auch longitudinal in gleichen Theilen, also mit 1, 2, 3 . . . Knoten schwingen, wodurch die Schwingungszahlen nach dem Gesetze 2, 3, 4 . . . mal größer werden und daher die harmonischen Obertöne bilden; doch ist es schwierig dieselben hervorzurufen. — Stäbe, die an beiden Enden frei sind, können nicht als Ganzes schwingen, weil man sie doch an irgend einer Stelle halten muß, wenn man sie zum Tönen bringen will, und weil diese festgehaltene Stelle jedenfalls ein Knoten wird. Durch einen Knoten aber pflanzt sich die Schwingungsbewegung wie in allen Fällen, so auch hier fort, da der Knoten nicht ein absoluter Ruhepunkt, sondern nur ein Durchgangspunkt entgegengesetzter Bewegungen ist. Klemmt man einen wagrechten Stab in der Mitte fest und reibt die eine Hälfte bis zum Tönen, so wird eine das andere Ende berührende hängende Kugel heftig weggeschleu-

dert. Glasröhren, die man in der Mitte faßt, kann man durch Reiben der einen Hälfte so heftig erschüttern, daß die andere Hälfte in ringförmige Stücke zerbricht. Auch wird durch das Tönen eines Glasstabes seine innere Constitution so verändert, daß er sich gegen durchgehendes Licht anders verhält wie in der Ruhe. Für beiderseits freie Stäbe gelten Fl. (35) und (36), weil sie an den freien Enden Bäuche haben, weil also die zwei Hälften schwingen wie die Hälften eines beiderseits festgehaltenen Stabes. Sie können auch mit 2, 3, 4 . . . Knoten schwingen und geben dann ebenfalls die harmonischen Obertöne. — Ein einesends freier Stab kann an dem freien Ende keinen Knoten haben, weil hier eine Verdichtung wegen Mangels an Gegenwirkung unmöglich ist; das freie Ende ist ein Bauch, der Stab schwingt als halbe stehende Welle, wie die Hälfte eines doppelt so langen beiderseits befestigten oder beiderseits freien Stabes; daher lautet Formel (35) für diesen Fall $n = (1:4l)\sqrt{(eg:s)}$ und Fl. (36) nimmt die Gestalt an $c = 4ln$. Die Schwingungszahl eines an einem Ende festen Stabes ist halb so groß und demnach der Grundton eine Octave tiefer, wie bei einem gleich langen beiderseits festen oder freien Stabe. Schwingt ein solcher Stab mit Knoten, so muß das freie Ende immer ebenfalls ein Bauch sein; folglich ist das frei schwingende Endglied nur eine halbe Welle, nur die Hälfte der übrigen Glieder; der letzte Knoten liegt also um $^1/_3$, $^1/_5$, $^1/_7$ . . . der Stablänge von dem freien Ende entfernt; die Wellen sind 3, 5, 7 . . . mal kürzer als für den ganzen Stab, die Töne also 3, 5, 7 . . . mal höher als der Grundton. — Berechnet man den transversalen und den longitudinalen Grundton eines und desselben Stabes (siehe Aufg. 412 und 416), so ergibt sich der longitudinale Ton als viel höher wie der transversale; durch Vergleichung der Formeln (34) und (36) erfährt man, daß die Zahl der longitudinalen Schwingungen sich zu derjenigen der transversalen verhält, wie die Länge des Stabes zur $3^1/_2$fachen Dicke desselben, wenn hierbei der Stab am einen Ende fest ist, wie eben jene beiden Aufgaben zeigen. Doch ist leicht ersichtlich, daß man Stäbe herstellen kann, deren Längs- und Querton von derselben Höhe ist; von solchen Stäben hat Terquem (1858) nachgewiesen, daß beide Töne immer gleichzeitig auftreten.

Die Schwingungen flüssiger Stäbe wurden bereits 1834 von Cagniard-Latour untersucht; eine in einer Glasröhre befindliche flüssige Säule wurde durch Reiben der Glasröhre zum Tönen gebracht; die beiderseits offene Röhre gab die höhere Octave des Tones der an einem Ende geschlossenen Röhre, bestätigte also auch hier das oben für die festen Stäbe gefundene Gesetz. Wertheim (1848) brachte eine an einer Seitenwand eines großen mit Wasser gefüllten Gefäßes angeschraubte Pfeife im Wasser zum Tönen, indem er durch comprimirte Luft einen Wasserstrom durch dieselbe in das Wasser des Gefäßes trieb; er fand das Gesetz der Längen auch für die flüssigen Stäbe bestätigt; dagegen gehorchte die flüssige Säule nicht der Fl. (36) $n = c:2l$; vielmehr betrug die Schwingungszahl nur $n\sqrt{^2/_3}$. Wertheim erklärte diese Abweichung durch die Annahme, daß auch in den flüssigen Stäben wie in den festen (nach 65.) bei einer Längendilatation eine Quercontraction und bei einer Längencontraction eine Querdilatation von $^1/_3$ auftrete; hierdurch würde (274.) die Geschwindigkeit des Schalles in einer flüssigen Säule $= \sqrt{^2/_3}$ mal der Geschwindigkeit in der unbegrenzten Flüssigkeit, wodurch in Fl. (36) sich n in demselben Verhältnisse ändere. Helmholtz (1870) sprach sich gegen diese Annahme aus, weil sie voraussetze, daß eine durch einen Druck verkürzte Säule sich ohne Hinderniß im Querschnitte dilatiren könne, was doch bei einer in ein Glas- oder Messingrohr eingeschlossenen flüssigen Säule unmöglich zu erwarten sei; indessen sei zu vermuthen, daß gerade die Elasticität der Wand, die Dicke derselben und der Durchmesser der Röhre einen Einfluß auf die Tonhöhe und sonach auf die Geschwindigkeit des Schalles in der Flüssigkeit ausüben könne. Diese Vermuthung wurde durch Versuche von Kundt (1874) bestätigt, welche den Zweck hatten, stehende Wellen in flüssigen Säulen zu erzeugen und dieselben durch Staubfiguren sichtbar zu machen. Eine weite Glasröhre war am einen Ende zugeschmolzen oder durch einen Kautschukstopfen oder eine Membran geschlossen; das andere Ende war ebenfalls durch einen Stöpsel geschlossen; doch ging durch denselben eine engere, geschlossene Glasröhre in die weitere mit Flüssigkeit erfüllte Röhre. Wurde nun der äußere Theil dieser engen Röhre gerieben, so pflanzten sich die Schwingungen auf die Flüssigkeit fort; war dieselbe nicht luftfrei gekocht, so brachten die Bewegungen nur die absorbirte Luft zur Entwickelung; war dagegen die Flüssigkeit luftfrei, so theilte sie sich in kleine stehende Wellen, die man an höchst feinem auf den Wänden der Glasröhre ausgebreiteten Eisenpulver erkennen und messen konnte. Die Entstehung dieser kleinen Wellen wird folgendermaßen bewirkt: da die enge Röhre ihre Schwingungen auf die Flüssigkeit überträgt, so schwingen beide in gleichen Zeiten, haben also auch gleiche Schwingungszahlen. Weil nun $l = c:2n$, jedoch aber die Schallgeschwindigkeit c des Wassers ungefähr der 4te Theil von der des Glases ist, so ist auch die Wellenlänge l für das Wasser etwa der 4te Theil

von der Wellenlänge des Glases. Ist daher die engere Röhre ebenso lang wie die weitere, so theilt sich das Wasser in 4 stehende Wellen. Kennt man weiter die Länge dieser Wellen, und man kann sie an der weiten Röhre mit dem Zirkel abmessen, so erhält man nach der Fl. $c = 2 l n$ die Geschw. des Schalles im Wasser. Als nun Kundt nach und nach Röhren von verschiedener Weite und Wanddicke anwandte und immer c nach den Wellenlängen berechnete, ergab sich, daß c immer größer wurde, wenn die Wanddicke zunahm und die lichte Weite der Röhre abnahm. Hiermit war die Vermuthung von Helmholtz bestätigt.

Wichtiger als die Schwingungen flüssiger Stäbe sind die der luftförmigen Stäbe oder der Luftsäulen, welche seit den ältesten Zeiten als Pfeifen musikalisch verwendet werden.

Longitudinale Schwingungen von Luftsäulen. Damit Luftsäulen in andauernde Schwingungen gerathen können, müssen sie in einerseits oder beiderseits offene Röhren, in der Akustik Pfeifen genannt, eingeschlossen sein; hiernach unterscheidet man gedeckte und offene Pfeifen. Eine Luftsäule wird in Schwingungen versetzt, wenn ein Luftstrom an dem einen Ende reibend vorbeigeht, oder wenn ein in der Pfeife sitzendes, dünnes elastisches Stäbchen, Zunge genannt, schwingt und seine Schwingungen der Luftsäule mittheilt; das erste geschieht in den Lippenpfeifen, das letzte in den Zungenpfeifen. Da eine Luftsäule wie ein elastischer Stab vermöge ihrer Elasticität schwingt, so gilt hier das Gesetz in 249. über die schwingenden Stäbe. Ein gedecktes Luftsäulenende entspricht einem eingespannten Stabende; es muß einen Schwingungsknoten bilden, weil die den Boden berührenden Theilchen unmöglich longitudinal schwingen können; für eine gedeckte Pfeife gelten demnach dieselben Gesetze wie für einen einerseits befestigten Stab. Ein offenes Luftsäulenende entspricht einem freien Stabende, aber nicht vollständig; denn ein freies Stabende mit seinen großen Elasticitätskräften kann von dem äußeren Luftdrucke kaum berührt werden; die Luft einer Röhrenmündung wird aber bei jeder Verdünnung oder Verdichtung auf die äußere Luft wirken und von dieser eine Gegenwirkung erfahren; eine offene Pfeife wird also den Gesetzen für einen beiderseits freien Stab nicht absolut genau folgen.

250

Fig. 138.

1. Die gedeckte Lippenpfeife (Daniel Bernoulli 1762). Als Urbild derselben wählen wir die gedeckte, viereckige, hölzerne Orgelpfeife (Fig. 138). Durch das Mundstück b wird die Luft in den Fuß a geblasen; die Luft strömt durch die Windspalte c hinter der Unterlippe d aus und stößt gegen die Oberlippe e; hierdurch wird der Luftstrom getheilt, und der eine Theil verdichtet die Luft der Röhre. Diese Verdichtung zwingt den Luftstrom, ganz außerhalb der Röhre zu bleiben und nur an der Röhrenluft vorbeizustreichen ins Freie, wodurch jetzt eine Verdünnung entsteht. Verdichtung und Verdünnung bilden eine Welle, die von dem gedeckten Ende reflectirt wird und mit einer neuen Welle zu einer stehenden Longitudinalwelle interferirt. Die Schwingungszahl ist nach Fl. (35) für den einerseits festen Stab $n = (1 : 4l) \sqrt{(eg : s)}$; hierin ist e, die Elasticität, gleich dem Luftdrucke, also gleich dem Barometerstande h multiplicirt mit dem spec. Gew. s' des Quecksilbers. Indessen muß hier noch ein Coëfficient eingeführt werden, der den Einfluß der Wärme angibt. Bei jeder Luftverdichtung wird nämlich wegen verbrauchter Arbeit Wärme erzeugt und bei jeder Verdünnung aus entgegengesetztem Grunde Wärme verzehrt; durch erhöhte Wärme aber wird die Luftspannung größer; an der verdichteten Stelle wird daher die Spannung vergrößert und an der verdünnten Stelle verkleinert. Aus dem ersten Grunde wird die Verdichtung rascher fortgepflanzt und demnach die

Schwingungszeit kleiner; dasselbe findet vermöge des zweiten Grundes statt, weil das erneuerte Eindringen des Luftstromes in den Verdünnungsraum hierdurch beschleunigt wird. In der Lehre von der Wärme werden wir sehen, daß die Schwingungszahl durch diese Einflüsse $\sqrt{1,42}$ mal so groß wird, daß also

$$n = (1 : 4l)\sqrt{(1,42 h s' g : s)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (37).$$

Da nun $n = c : 4l$, so ist $c = \sqrt{(1,42 h s' g : s)}$ . . . . (38).

Schwingt eine gedeckte Luftsäule durch stärkeres Anblasen mit Knoten, so findet sich der erste in $1/3$, $1/5$, $1/7$ . . . der Pfeifenlänge vom freien Ende entfernt; die Töne machen 3, 5, 7 . . mal soviel Schwingungen als der Grundton.

Man kann dies leicht durch stärkeres Anblasen einer Pfeife nachweisen; denn sie gibt dann die zweite Quinte, die dritte Terz, die dritte kleine Septime u. s. w. — Sichtbar machen kann man die Knoten und Bäuche einer Luftsäule: 1. Mittels des Tamburins von Hopkins (1838); ein ganz kleines, mit Sand bestreutes Tamburin wird in eine tönende Glasröhre hinabgelassen; an den Knoten liegt der Sand ruhig, an anderen Stellen hüpft er. 2. Mittels der Flammenzeiger von König (1862); an den Knotenstellen und Bauchstellen viereckiger Pfeifen sind dieselben durchlöchert und mit Membranen versehen; über diesen Membranen befinden sich kleine Zellen mit Gasbrennern, die von einem Gasbehälter gespeist werden; steckt man während des Tönens der Pfeife das aus den Brennern strömende Gas an, so zuckt an den Knoten die Gasflamme heftig hin und her, bleibt aber an den Bäuchen ziemlich ruhig; hieraus ist ersichtlich, daß an den Bäuchen die Membran keine Druckveränderung erfährt, daß also hier die Dichtigkeit der Luft unverändert bleibt, während an den Knoten die rasch wechselnde Verdichtung und Verdünnung der Luft und die dadurch hervorgebrachte Aus- und Einbiegung der Membran an dem Zucken der Flamme zu erkennen ist. 3. Mittels der Staubfiguren von Kundt (1866). Eine lange durch Kork verschlossene Glasröhre wird mittels Reiben zum Longitudinaltönen gebracht; die Schwingungen theilen sich in gleicher Zahl und Zeit durch den Kork der Luft mit und erzeugen in derselben eine größere Zahl von stehenden Wellen; denn aus der Formel $l = c : 2n$ ergibt sich für Luft ein viel kleineres l als für Glas, weil c für die Luft viel kleiner ist als für Glas. Da die Schallgeschwindigkeit im Glase die 16fache von der in Luft ist, so ist die Länge der stehenden Luftwellen bei gleicher Schwingungszahl der 16te Theil von der Länge der Glaswelle; wird also die Glasröhre, z. B. durch Anfassen in der Mitte, in eine einzige stehende Welle verwandelt, so entstehen in ihr 16 Luftwellen. Diese zahlreichen Luftwellen sind sichtbar, wenn man in der Röhre vorher Bärlappsamen herumgeschüttelt hat; derselbe ordnet sich in ganz gleiche zierliche Figuren; für den Fall, daß die Länge der Luftsäule ein Vielfaches der Länge der stehenden Luftwelle des Tones ist, geht der Staub ganz von den Bäuchen weg an die Knoten; findet jenes Verhältniß nicht statt, so bleibt in zierliche Schichten geordneter Staub auch zwischen den Knoten, die entweder durch sternförmige Figuren oder durch größere Staubhäufchen ausgezeichnet sind. — Daß die Länge der gedeckten Pfeife für den Grundton gleich $1/4$ der fortschreitenden Wellenlänge des Tones ist, kann man entweder durch Berechnung nach Formel (37) zeigen oder durch einen Versuch mittels Stimmgabel und Glascylinder; hält man über die Oeffnung eines solchen eine tönende Stimmgabel, während man Wasser eingießt, so wird in einem gewissen Augenblicke das Gefäß mittönen; die Berechnung ergibt, daß in diesem Augenblicke die Länge der Luftsäule in dem Gefäße gleich $1/4$ der Wellenlänge des Stimmgabeltones ist. Nur in diesem Falle kann nämlich die Gabel ihren Ton der Luftsäule mittheilen (Analogie mit Meldes Apparat); denn während die Gabel voranschwingt, also in der halben Schwingungszeit, schreitet die Verdichtung um $1/2$ Wellenlänge, bis an den Boden der Pfeife und zurück bis zur Gabel fort; jetzt folgt die Verdichtungswelle der Gabel auf ihrem Rückgange, so daß die entstehende Verdünnung sich während des Rückganges ebenfalls um die halbe Wellenlänge, also die Röhre voran und zurück fortpflanzen kann und mit der Gabel gleichzeitig an der äußersten Grenze des Rückganges anlangt. Wäre aber die Röhre z. B. länger als $1/4$ der Wellenlänge, so wäre die Verdichtung noch auf dem Rückwege, wenn die Verdünnung schon im Fortschreiten wäre, sie würde folglich von dieser aufgehoben werden. — Daß die Schwingungszahl umgekehrt mit der Länge wächst, sieht man an Pfeifen, die 2, 3, 4 . . . mal kürzer sind als eine andere und die harmonischen Obertöne ergeben, oder an Pfeifen, die $9/8$, $5/4$, $4/3$ . . . mal kürzer sind als eine andere und so die Töne der Dur-Tonleiter hervorbringen; hierzu benutzt man auch die Stimmpfeife, in welcher ein Kolben von Kork mittels einer graduirten Stange verschoben werden kann; dadurch erhält die gedeckte Luftsäule solche verschiedenen Längen, wie sie für eine Tonleiter nothwendig sind; in ähnlicher Weise stimmt man gedeckte Orgelpfeifen, indem man den Deckelkolben mehr in die Röhre schiebt oder mehr zurückzieht.

Auch die Unabhängigkeit der Schwingungszahl von dem Durchmesser einer Röhre ist leicht zu zeigen. Indessen gelten die zwei Gesetze über die Länge und den Durchmesser nicht absolut genau für die gedeckten Lippenpfeifen, weil das Mundende der Luftsäule nicht gleichzeitig in seinem ganzen Querschnitte in Schwingungen versetzt wird, und weil auch das Mundstück die Schallwelle reflectirt; hierdurch ist der Bauch nicht ganz genau an dem Mundende und der Knoten nicht genau an der Deckung, die Wellenlänge wird etwas größer, der Ton etwas tiefer. Die Vertiefung ist um so größer, je größer die Weite der Röhre und je enger der Mund ist; diesen Umstand benutzt man, um mittels der sogenannten Bärte, Seitenlappen des Mundloches, Orgelpfeifen zu stimmen. Anwendung finden die gedeckten Pfeifen in den Orgeln; die tiefste Octave, c_{-2} bis h_{-3}, wird in den gewöhnlichen Orgeln durch gedeckte Pfeifen erzeugt, weil dieselben, wie wir noch sehen werden, nur die halbe Länge offener Pfeifen für jene Töne nöthig haben; doch haben die größten Orgelwerke auch diese tiefste Octave in offenen Pfeifen, die dann bis über 30′ Länge haben müssen. Auch höhere Register der Orgel wie das Flötenregister bestehen aus gedeckten Pfeifen, weil dieselben sanfter und gedämpfter klingen als die offenen Pfeifen. Die Clarinette ist eine am Mundstück gedeckte Pfeife, aber eine Zungenpfeife. Aus gedeckten Pfeifen ohne Lippen besteht die Panspfeife (Syrinx); die Weidenpfeife der Kinder dagegen ist eine gedeckte Lippenpfeife.

Eine neue, sehr sinnreiche, aber etwas complicirte Methode der optischen Analyse der Klänge einer gedeckten Pfeife von Boltzmann und Töpler (1870) macht es nicht nur möglich, die Schwingungsbewegung eines Pfeifentones zu sehen, sondern auch die Verdichtung und Verdünnung an einem Knoten zu messen, ja sogar die Größe der Schwingungen der einzelnen Lufttheilchen zu berechnen. Die Methode vereinigt die Principien der Stroboskopie und der Interferenz. Das erste Princip wird mit intermittirender Beleuchtung durchgeführt. Bekanntlich erscheint ein in dunkler Nacht fliegender, aber plötzlich von einem Blitzstrahl beleuchteter Vogel in Ruhe. Ebenso erscheint eine im Dunkeln schwingende Saite in ihrer äußersten Lage links in Ruhe, wenn man sie im ersten Momente einer Schwingungszeit beleuchtet; beleuchtet man sie z. B. nach 5¼ Schwingungszeiten wieder, so erscheint sie etwa in einer halben Verschiebung nach links in Ruhe; wird sie nach abermals 5¼ Schwingungszeiten beleuchtet; so sieht man sie in der mittleren Lage in Ruhe; fährt man so weiter fort, so sieht man die Saite langsam ihre verschiedenen Schwingungslagen wechseln, sie zeigt uns ihre ganze schwingende Bewegung, nur 21mal langsamer, so daß man sie deutlich verfolgen kann. Um nun eine intermittirende Beleuchtung zu erzeugen, war auf einer Stimmgabel, die nach der Helmholtz'schen Methode mittels eines Elektromagnetes in ununterbrochenen, starken Schwingungen erhalten wurde, ein schwingender Spalt angebracht, durch welchen Sonnenstrahlen intermittirend nach der Pfeife gingen; und zwar traf die unterbrochene Beleuchtung die gedeckte Stelle in der Weise, daß die halbe Beleuchtung durch den Knoten in der Pfeife, die andere durch die ruhige Luft außerhalb der Deckung ging. Da sich das Licht in der Verdichtung des Knotens langsamer fortpflanzt als in der äußeren Luft, so erfuhren die ersteren Strahlen gegen die letzteren eine Verzögerung in der Phase, welche man durch öfters wiederholte Reflexionen der ersteren Strahlen im Inneren der Pfeife bis auf eine halbe Wellenlänge steigern konnte; dann wurden die zwei verschiedenen Strahlenbündel wieder mit einander vereinigt und mußten daher nach den Gesetzen der Interferenz einander aufheben, es mußte ein dunkler Streifen entstehen. War die Unterbrechungszeit der Beleuchtung richtig gewählt, so mußte dieser Interferenzstreifen hin- und hergehen und mit beliebiger Langsamkeit die Schwingungen der Lufttheilchen nachahmen, und durch die gemessenen Dimensionen Angaben für die Berechnungen liefern. Wurde der Grundton angeblasen, so ergab sich, daß die Schwingungsbewegung eine vollkommen pendelartige war; der Unterschied zwischen der größten und kleinsten Dichte betrug am Knoten 1/80 Atmosphäre, während Mach (1873) für Glasstäbe Unterschiede von 3—400 Atmosphären demonstrirt. Die totale Verschiebung eines Lufttheilchens in der Nähe des Pfeifenmundes betrug 2,5mm, im Munde selbst 8mm. Wurde das Anblasen so verstärkt, daß der erste Oberton mit dem Grundtone zusammenklang, so standen die Streifen abwechselnd still und bewegten sich dann sprungweise, weil abwechselnd die Verdichtung des Grundtones mit der Verdünnung oder Verdichtung des Obertones zusammenfällt; die Schwankung der Luftdichte betrug 1/55 Atm., die Totalverschiebung eines Lufttheilchens im Bauche 5mm, im Munde 17mm; die Amplitude des Obertones war der 4te Theil und die Intensität desselben der 16te Theil von den betreffenden Größen des Grundtones.

2. Die offene Lippenpfeife (Daniel Bernoulli 1762). Die Tonerregung geschieht hier wie bei der gedeckten Pfeife; da aber das offene Luftsäulenende keinen Knoten, sondern nur einen Bauch bilden kann, wie die Erregungsstelle selbst, so 251

besteht die einfachste Schwingungsweise der offenen Pfeife darin, daß sie in der Mitte einen Knoten hat, also ebenso schwingt wie eine gedeckte Pfeife von halber Länge; hieraus ergibt sich die Schwingunszahl einer offenen Pfeife

$$n = (1 : 2l) \sqrt{(1,42\ hs'g : s)} \quad . \quad . \quad . \quad (39).$$

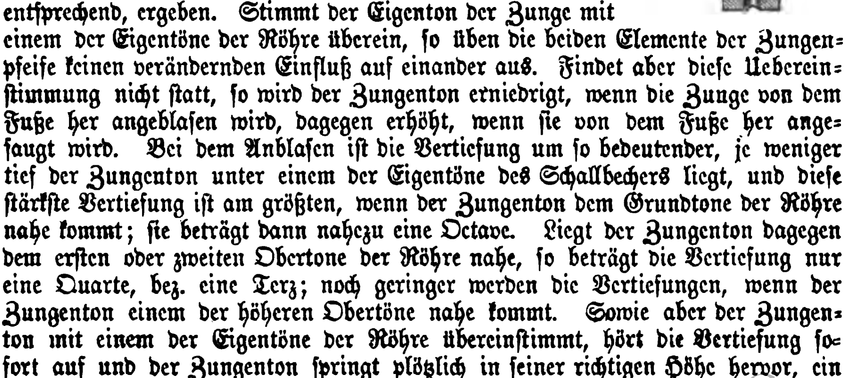
Da nun $n = c : 2l$, so ist auch hier $c = \sqrt{(1,42\ hs'g : s)}$ . . . . (38). Uebrigens folgt Formel (39) auch aus der Uebereinstimmung der Schwingungsweise offener Pfeifen mit derjenigen beiderseits freier Stäbe. Aus dieser Formel folgt zunächst für offene Pfeifen dasselbe Gesetz der Längen und des Durchmessers wie für gedeckte Pfeifen und Stäbe; sodann ergibt dieselbe, daß der Grundton einer offenen Pfeife eine Octave höher ist als der Grundton einer gedeckten Pfeife von gleicher Länge. — Endlich kann eine offene Pfeife auch wie ein beiderseits freier Stab mit 2, 3, 4 . . . Knoten schwingen; sie erzeugt dann Töne von 2, 3, 4 . . . mal so viel Schwingungen, als sie der Grundton enthält; die Obertöne einer offenen Pfeife bilden also die ununterbrochene Reihe der harmonischen Obertöne.

Man weist dies leicht durch eine beliebige offene Pfeife nach, die bei stärkerem Anblasen die Octave, die zweite Quinte, die zweite Octave, die dritte Terz, Quinte, kleine Septime u. s. w. des Grundtones gibt. Das Sichtbarmachen der Knoten kann nach den zwei ersten Methoden für gedeckte Pfeifen geschehen. Das Gesetz der Längen hat so vielfache Anwendung, daß man sich häufig genug von dessen Geltung überzeugen kann; für die tiefen Orgeltöne sind lange Pfeifen nöthig, z. B. für c_{-2} eine Pfeife, deren Länge nach (38) $= c : 2n = 333 : 64 = 5{,}17^m = 16$ Fuß ist; man nennt daher dieses c auch das 16füßige, und das eine Octave tiefere c_{-3} das 32füßige, obwohl man dasselbe gewöhnlich durch eine gedeckte Pfeife von der halben Länge erzeugt. Der höchste Orgelton c_8 bedarf dagegen nur einer Pfeife von $1^1/_2''$ Par. — Die Posaunen erhalten die größere Länge durch Ausziehen der Theile, andere Instrumente werden durch Löcher und Klappen verkürzt oder verlängert; denn eine hinreichende große Oeffnung in einer Pfeife macht diese Stelle zu einem offenen Ende, also die Pfeife kürzer, wenn die Klappe dieser Oeffnung oder der darauf gesetzte Finger gehoben wird. — Wenn nun auch die offenen Pfeifen dem Gesetze der Längen im Allgemeinen folgen, so gehorchen sie doch der Fl. (39) durchaus nicht so genau, daß man mittels derselben die Länge einer Pfeife für einen bestimmten Ton unter allen Umständen berechnen könnte. Zunächst haben die Weite und Höhe des Mundes und der Fuß denselben Einfluß wie bei den gedeckten Pfeifen; hier findet aber auch noch eine Einwirkung des offenen Endes statt; denn die Schwingungen pflanzen sich noch über dieses Ende hinaus in die freie Luft fort und werden erst allmälig von dieser, und zwar deßhalb reflectirt, weil dieselbe freier beweglich und dadurch dünner als die innere Pfeifenluft erscheint. Man kann dieses Uebergreifen der Bewegung an einer mit Sand bestreuten Membran sehen; hält man dieselbe über das offene Ende einer tönenden Pfeife, so hüpft der Sand. Hierdurch wird demnach die Wellenlänge größer, der Ton also etwas tiefer. Noch mehr weichen die Pfeifentöne von Fl. (39) ab, wenn der Querschnitt im Verhältnisse zur Länge bedeutend ist, besonders wenn wie bei der cubischen Pfeife der Abstand des Mundes von der Hinterfläche der Pfeife groß wird. An die Stelle von Fl. (39) tritt dann für die praktische Berechnung der Pfeifenlänge der Satz von Cavaillé-Coll (1860): die Pfeifenlänge ist gleich der Wellenlänge des Tones weniger der doppelten Tiefe der Pfeife, ein Gesetz, das Wertheim in Uebereinstimmung mit der Theorie fand. — Das Gesetz über den Zusammenhang offener und gedeckter Pfeifen läßt sich an jeder offenen Pfeife zeigen, die ihre tiefere Octave gibt, wenn man sie oben verschließt, oder auch mit der Stimmpfeife, die ihre höhere Octave gibt, wenn man den Kolben ganz herauszieht. Theilweises Decken einer offenen Pfeife bringt eine geringe Vertiefung des Grundtones hervor; dies benutzt man zum Stimmen offener Pfeifen, indem man seitliche Lappen an dem offenen Ende von Zinnpfeifen, die sogenannten Bärte, oder die Bleiplatten der Oeffnung ein- oder auswärts biegt. Aehnliches bezwecken die Hornisten durch Stopfen des Schallbechers mit der Hand. — Wie ein langer, dünner Stab leichter in eine größere Zahl von stehenden Wellen zu zerlegen ist als ein kurzer dicker, so ist es auch mit den Luftsäulen; bei langen, dünnen Luftsäulen sprechen die Obertöne leichter an als der Grundton, bei Säulen von größerem Querschnitte der Grundton leichter als die Obertöne. Orgelpfeifen, die bekanntlich nur auf ihren Grundton beansprucht werden, müssen daher große Durchmesser haben; auch bei den Holzblasinstrumenten wird die Weite im Verhältnisse zur Länge nicht zu klein genommen, da man hier nur die tieferen Obertöne benutzt

und die höheren Töne durch Klappen erzeugt. Ebenso erlauben weitgebaute Blechinstrumente, wie die Ophicleide, das Bombardon und das Serpent noch die Benutzung des Grundtones; in vielen Blechinstrumenten aber ist die Weite der Röhre klein und die Länge sehr groß, so daß man nur die höheren Obertöne erzeugen kann; die Lücken der Tonleiter werden jetzt ebenfalls durch Klappen ausgefüllt, bei den Posaunen durch Ausziehen. — Daß die Tonhöhe der Pfeifen nicht von dem Material der Wände beeinflußt ist, folgt schon daraus, daß das Festhalten der Instrumente mit der Hand, was nothwendig die stärkeren Schwingungen der Wände aufhebt, keinen Einfluß ausübt; dies gilt aber nur so lange, als das Material fest ist; schlafferes Material, wie z. B. Pergament verändert auch die Tonhöhe. — Von den musikalischen Instrumenten sind die Piccolo-Flöte, die Flöte und viele Orgelpfeifen offene Lippenpfeifen.

3. Die Zungenpfeife (W. Weber 1827). Die Tonerregung geschieht bei der Zungenpfeife (Fig. 139 stellt die bei Orgeln gebräuchliche Einrichtung dar) durch einen intermittirenden Luftstrom, durch Luftstöße, wie bei der Sirene. Die Unterbrechung des Luftstromes geschieht aber hier durch ein elastisches Metallplättchen, Zunge genannt, das über einem nahezu gleichen, seitlichen Spalte der Röhre liegt und an dem einen Ende fest, an dem größten Theile seiner Länge aber frei beweglich ist und etwas von den Rändern des Windspaltes absteht. Wird nun durch das Luftrohr r Luft in den Fuß F geblasen, so strömt diese durch den Spalt in den Schallbecher (Ansatzrohr) oder die Pfeife R und bringt dort eine Verdichtung hervor; da aber in dem Fuße die Luft durch fortwährendes Nachströmen noch dichter ist, so wird die Zunge gegen den Spalt gedrückt, dieser wird geschlossen und der eindringende Luftstrom unterbrochen; nun kehrt die Zunge vermöge ihrer Elasticität, aber jedenfalls auch unter dem Einflusse der Luftmassen zurück, öffnet dadurch den Spalt wieder und erlaubt ein erneutes Einströmen der Luft, einen zweiten Luftstoß. So bildet sich aus periodischen Luftstößen der Ton und ist daher viel stärker, als wenn die Zunge für sich allein oder die Luft im Schallbecher für sich allein schwingen würde. Die Schwingungszahl wird durch die vereinigte Wirkung der Elasticität und der Dimensionen der Zunge und der Luftsäule im Schallbecher bedingt. Die Zunge würde für sich allein eine gewisse Schwingungszahl, einen Eigenton erzeugen, und ebenso würde die Luftsäule für sich allein schwingend gewisse Schwingungszahlen, ihrem Grundtone und ihren Obertönen entsprechend, ergeben. Stimmt der Eigenton der Zunge mit einem der Eigentöne der Röhre überein, so üben die beiden Elemente der Zungenpfeife keinen verändernden Einfluß auf einander aus. Findet aber diese Uebereinstimmung nicht statt, so wird der Zungenton erniedrigt, wenn die Zunge von dem Fuße her angeblasen wird, dagegen erhöht, wenn sie von dem Fuße her angesaugt wird. Bei dem Anblasen ist die Vertiefung um so bedeutender, je weniger tief der Zungenton unter einem der Eigentöne des Schallbechers liegt, und diese stärkste Vertiefung ist am größten, wenn der Zungenton dem Grundtone der Röhre nahe kommt; sie beträgt dann nahezu eine Octave. Liegt der Zungenton dagegen dem ersten oder zweiten Obertone der Röhre nahe, so beträgt die Vertiefung nur eine Quarte, bez. eine Terz; noch geringer werden die Vertiefungen, wenn der Zungenton einem der höheren Obertöne nahe kommt. Sowie aber der Zungenton mit einem der Eigentöne der Röhre übereinstimmt, hört die Vertiefung sofort auf und der Zungenton springt plötzlich in seiner richtigen Höhe hervor, ein

Fig. 139.



252

Sprung, der in dem ersten Falle einer Octave ganz nahe kommt. Doch gilt dies Alles nur für leicht bewegliche Zungen; schwere und steife Zungen erfahren durch die schwingende Luftsäule des Schallbechers keine oder nur eine geringe Veränderung der Tonhöhe, dagegen eine größere Verstärkung des Tones.

Erklärung und Nachweise. Wenn Zungenton und Röhrenton übereinstimmen, so schwingt die Zunge auch übereinstimmend mit den Lufttheilchen der Pfeife; es ist daher ein gegenseitig verändernder Einfluß unmöglich, die Pfeife tönt als offene Röhre, sie hat an der Zunge und an dem anderen Ende Bäuche und (bei dem Erklingen des Grundtones) in der Mitte einen Knoten. Stimmen aber Zungenton und Röhrenton nicht überein, so muß durch die verschiedene Bewegung von Zunge und Luft in der Gegend der Zunge Luftverdichtung und Luftverdünnung abwechseln, der Knoten muß näher an die Zunge rücken, die Pfeife wird mehr zu einer gedeckten. Beim Anblasen kann die Zunge sich nur voranbewegen in die Röhre hinein, wenn sie sich in einer Verdünnung befindet, deren Theilchen ebenfalls nach innen schwingen, wenn also der Knoten so zu sagen außerhalb der Pfeife, im Fuße liegt; die äußere neu eindringende Luft übt dann gegen die Verdünnung einen Druck aus, der die Zunge voranschiebt, aber zugleich ihrem Bestreben zurückzukehren, ihrer Elasticität entgegenwirkt und dadurch nach Fl. (29) die Schwingungszeit vergrößert. Bei der Rückkehr der Zunge nach außen ist sie in einer Verdichtung, die sie nach außen treibt, aber wiederum ihre Elasticität vermindert und daher ebenfalls die Schwingungszeit vergrößert. So erklärt sich die Vertiefung des Zungentones durch eine nicht übereinstimmende Röhre. Diese Vertiefung ist um so größer, je stärker die abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen sind. Eine leichte Vergleichung der hier denkbaren Fälle läßt aber erkennen, daß dieselben um so stärker werden, je näher der Grundton der Röhre über dem Zungentone liegt; denn alsdann kann die Zunge fast auf ihrem ganzen Wege gleichmäßig auf die Luft einwirken, ohne durch Umkehrung der Lufttheilchen eine Gegenwirkung zu erfahren. Ist also der Zungenton ganz nahe unter dem Röhrentone, so ist der Wechsel am stärksten, der in dem Fuße zu denkende Knoten fällt fast in die Zunge, die Pfeife ist an der Zunge gedeckt, sie gibt die tiefere Octave des offenen Pfeifentones; dieses ist die stärkste Vertiefung. Wenn der Zungenton in größerer Entfernung unterhalb des Röhrentones liegt, so wirkt die schwingende Zunge bald auf vorangehende, bald auf zurückkehrende Lufttheilchen, die Verdichtung nnd ebenso die Verdünnung werden weniger stark sein, der in dem Fuße zu denkende Knoten fällt weiter von der Zunge weg, der Zungenton wird weniger vertieft; die Vertiefung ist fast gleich Null, wenn die Röhre nur $1/4$ der zum Eigentone der Zunge stimmenden offenen Pfeifenlänge hat. Ist also der Röhrenton viel höher als der Zungenton, so erfährt der letztere nur eine geringe Vertiefung. Diesen veränderlichen Einfluß verschiedener Röhrenlängen auf einen Zungenton kann man an einem Waizenhalme zeigen, an dem man einen kleinen, zungenförmigen Streifen bis auf eine Stelle losgeschnitten hat; derselbe gibt bei allmäligem Abschneiden des Halses immer höhere Töne; ebenso ein grüner Kornhalm, den man an dem einen Ende durch einen Druck gespalten und dadurch mit einer Doppelzunge versehen hat.

Ist der Zungenton höher als der Grundton der Röhre, so hebt die Zunge bei ihrer Rückkehr einen Theil der erzeugten Verdichtung wieder auf; daher wird anfänglich die Vertiefung nur gering sein; sie wird aber um so größer, je höher sich der Zungenton erhebt, weil eben durch die Aufhebung der Verdichtung die Elasticität der Zunge geschwächt wird; doch geht sie nicht wieder bis zu einer Octave, sondern nur bis zu einer Quarte; wenn der Zungenton doppelt so hoch als der Grundton der Röhre geworden ist, so stimmt er mit dem ersten Obertone derselben überein und springt daher plötzlich wieder in seiner vollen Höhe hervor. In ähnlicher Weise erklären sich die übrigen Erscheinungen der Zungenpfeife, besonders die umgekehrten Vorgänge beim Ansaugen.

Da hiernach die Zungenpfeifen als mehr oder minder an der Zungenstelle gedeckte Pfeifen anzusehen sind, so geben sie viel tiefere Töne als offene Pfeifen von gleicher Länge; von dieser vertiefenden Wirkung der Zunge auf Pfeifen macht man Anwendung bei den Orgeln; das Posaunen- und das Trompetenregister der Orgel geben 32-, 16- und 8füßige Töne, ohne Pfeifen von diesen Längen zu besitzen; indessen sind sie doch länger als die Hälften dieser Maße; denn erstens ist die Deckung an dem Zungenende nicht vollständig, und zweitens läßt man diese Pfeifen an dem offenen Ende sich kegelförmig erweitern, um den Ton stärker und voller zu machen und den dumpfen Ton der Gedackten zu vermeiden; durch eine solche Erweiterung aber wird die Deckung noch unvollständiger, die Pfeifen nähern sich etwas den offenen und müssen daher etwas länger als die Gedackten sein. Dieser Unterschied tritt auch bei der Clarinette einerseits und der Oboë und dem Fagott andererseits hervor. Alle sind wie die Kindertrompete Zungenpfeifen; die Clarinette verhält sich wegen der gleichen Weite des Rohres ganz wie eine gedeckte Pfeife, sie klingt

eine Octave tiefer wie die Flöte und gibt nur ungeradzahlige Obertöne; Oboë und Fagott kommen aber wegen ihrer conischen Erweiterung den offenen Pfeifen nahe. Die Clarinette hat eine einfache Zunge aus italienischem Rohr geschnitten, die fest auf den Schnabel gebunden wird und beim Blasen die Mundöffnung fast schließt; Oboë und Fagott haben Doppelzungen, wie das Kornpfeifchen und die Weidenschalmei; die Zunge der letzteren ist eine am Ende gespaltene Weidenrindenröhre; dieselbe wird an einem aus Weidenrinde gewundenen Horne befestigt, das alsdann stark schallende Töne gibt und das Urbild der Schalmei, der Oboë und des Fagotts ist. Auch die Blechinstrumente, wie Horn, Trompete, Posaune, Bombardon, Ophicleïde u. s. w. sind Zungenpfeifen, ohne Zungen zu besitzen; diese werden durch die Lippen des Bläsers ersetzt, die fest zusammen und an das Mundstück gepreßt und durch einen aus dem schmalen Lippenspalte dringenden Luftstrom in Schwingungen versetzt werden, wie ein Zuschauer deutlich sehen kann, wenn das Mundstück aus Krystallglas besteht; in ähnlicher Weise erklärt sich auch das Pfeifen mit Lippe, Zunge und Zähnen. — Wenn bei eigentlichen Zungenpfeifen die Zunge breiter ist als der Windspalt, so schlägt eine solche aufschlagende Zunge auf die Ränder desselben und gibt dem Tone einen schnarrenden Beiklang, wie in den Schnarrwerken der Orgel; ist aber die Zunge kleiner als der Windspalt, also durchschlagend oder einschlagend, so fällt der schnarrende Klang weg; der Ton ist weich und voll, wie in dem Register vox humana der Orgel. — Wenn eine Zunge sehr weit ausgreift, so folgt sie dem Gesetze des Isochronismus (225.) nicht mehr genau, wie das Pendel bei großen Schwingungen; die Schwingungen werden dann etwas langsamer. An diesem Mißstande leiden besonders diejenigen Instrumente, die nur Zungen ohne Pfeifen enthalten, wie die Mund- und die Ziehharmonica, das Harmonium, das Accordeon, das Aeolodicon, die Physharmonica u. dergl., die alle bei starkem Anblasen tiefer klingen. Da die longitudinalen Schwingungen der Luft gerade im Gegentheile durch stärkeres Anblasen beschleunigt werden, so tritt jener Uebelstand bei Zungenpfeifen weniger hervor; ja er läßt sich sogar durch eine passende Wahl der Dimensionen ganz aufheben; Webers compensirte Zungenpfeife (1827).

Ein Zungeninstrument ist auch das Stimmorgan (Johannes Müller 1837) der Menschen und vieler Thiere; die Lunge bildet den Blasebalg, die Luftröhre das Windrohr, der Kehlkopf den Fuß, dessen oberster Theil die Zunge enthält, der Rachen und der Mund den Schallbecher. Der Kehlkopf besteht aus dem obersten, stärksten Ringe der Luftröhre, Ringknorpel genannt, aus dem Schildknorpel (Adamsapfel) und den zwei Gießkannenknorpeln, welche durch mehrere Muskeln zu verschiedenen Bewegungen befähigt sind. Die Schleimhaut der Luftröhre geht in dem Kehlkopfe in ein sehr elastisches Gewebe über, das von der Vorderkante des Schildknorpels in zwei halbkreisförmigen Abtheilungen, die man Stimmbänder nennt, sich nach hinten zu den Gießkannenknorpeln zieht. Bei gewöhnlichem Athmen liegen diese beiden Häute schlaff über einander und schließen den Zwischenraum, so daß das Athmen durch eine schmale Fortsetzung dieses Zwischenraumes zwischen den zwei Gießkannenknorpeln, durch die sogenannte Athemritze geschieht. Bei der Tonbildung dagegen schließt sich die Athemritze, die Stimmbänder werden straff gespannt, und ihre Ränder liegen fast an einander, so daß nur ein feiner, gerader Spalt, die Stimmritze, übrig bleibt; durch diese dringt nun ein Luftstrom und versetzt die Stimmbänder in Schwingungen, die sich auf die Luftsäule in der Rachen- und Mundhöhle übertragen. Die Tonhöhe hängt ab von der Spannung und der Länge der Stimmbänder, sowie von der Länge der mitschwingenden Ränder der übrigen Theile und der Stärke des Luftstromes, aber nicht von der Weite der Stimmritze, welche nur das leichtere Ansprechen der Töne bedingt. Bei Männern haben die Stimmbänder eine Länge von 18^{mm}, bei Frauen nur von 12^{mm}; für tiefere Töne werden sogar die Ränder des Kehldeckels in Anspruch genommen, bei sehr hohen schwingen nur die geraden Ränder der Stimmbänder.

Singende Flammen oder die chemische Harmonica (Higgins 1777; Chladni 1800). Wird über die Flamme irgend eines Gases oder Dampfes eine Röhre gehalten, so daß die Flamme im Inneren der Röhre brennt, so entsteht ein Ton, den man die chemische Harmonica nennt; am leichtesten sprechen Röhren über Wasserstoff- oder Leuchtgasflammen an. Die Höhe des Tones folgt ganz dem Gesetze für offene Pfeifen; sie ist also umgekehrt proportional der Länge der Röhre, aber unabhängig von der Weite und dem Stoffe derselben; einen geringen Einfluß üben die Temperatur und die Größe der Flamme und andere Umstände. Außer dem Grundtone der betreffenden Röhre kann die Flamme auch noch die höheren Obertöne derselben geben, wenn man die Flamme immer mehr verkürzt; Tyndall erhielt von einer Röhre die vier ersten Obertöne. Eine **253**

noch eben schweigende Flamme hüpft und singt, wenn ein Ton angegeben wird, der fast im Einklange mit dem Röhrentone ist; eine singende Flamme hüpft, verlischt und schweigt, wenn ein Ton erregt wird, der nicht ganz mit dem Flammentone im Einklang ist (Versuche von Graf Schaffgotsch (1857) und von Tyndall (1857). Das Gehorchen der Flamme im Singen und Schweigen ist am vollkommensten, wenn sich dieselbe ein wenig entfernt von dem „besten" Orte, d. i. von der Stelle befindet, an der sie am stärksten singt; das Auslöschen gelingt um so besser, je kleiner das Flämmchen ist, und je näher und stärker der äußere Ton erklingt. Verwandt sind die *sensitiven* und *sensiblen Flammen*, d. h. solche freie Flammen, welche durch hohen Druck im ausströmenden Gase im Flackern oder dem Flackern nahe sind; solche Flammen verkürzen oder verlängern sich, wenn ein Ton erklingt, ändern ihre Gestalt, erhalten oder verlieren Zacken, und gerathen in heftige Zuckungen; auch ausströmende Rauchsäulen und Flüssigkeitsstrahlen zeigen diese Erscheinungen.

Um diese interessanten Erscheinungen erklären zu können, hat man nach dem Vorgange Wheatstones (1834) optische Analysen der singenden Flammen vorgenommen. Man kam nämlich wegen des Zuckens der singenden Flammen auf den Gedanken, dieselben seien discontinuirlich; man dachte sich, der durch die Wärme beschleunigte Luftstrom in der Röhre verlösche die Flamme, mische sich aber in dem folgenden Moment mit dem ausströmenden Gase und erzeuge so ein leicht entzündliches Knallgas, zu dessen Wiederaufflammen die noch vorhandene Hitze ausreiche, und so eine ganz kleine Explosion hervorrufe; es sollte also der Ton durch zahlreiche Explosionen oder Luftstöße seine Erklärung finden und die singende Flamme sollte jeden Augenblick verlöschen und neu wieder aufglühen. Daß wir bei gewöhnlichem Zuschauen von dem Verlöschen nichts merken, erklärte man aus der Dauer des Lichteindruckes auf unsere Netzhaut, welche Dauer über die kurze dunkle Zwischenzeit hinüberreiche. In dieser Ansicht wurde man durch die optische Analyse der singenden Flammen bestärkt, bei welchen man darauf ausgeht, das Augenbild der Flamme jeden Moment auf eine andere Stelle der Netzhaut zu bringen. Dies kann schon dadurch geschehen, daß man während des Betrachtens der Flamme mit bloßem Auge oder durch einen Operngucker den Kopf verschiebt oder die Flamme selbst rasch zur Seite bewegt. Am deutlichsten geschieht es durch einen Spiegel, der schief an einer Walze sitzt und mit dieser rotirt; in einem solchen Spiegel muß das Bild der Flamme jeden Augenblick eine etwas andere Stellung einnehmen, weil der Spiegel ja selbst jeden Augenblick seine Richtung verändert; und da die Veränderung kreisförmig geschieht, so müssen auch die unendlich vielen Spiegelbilder der Flamme in einem Kreise stehen. Ist die Flamme ununterbrochen, so muß auch an jeder Stelle dieses Kreises ein Flammenbild stehen und alle diese Flammenbilder müssen zusammen einen feurigen, ununterbrochenen Kreis bilden, weil die Eindrücke der ersten Bilder noch im Auge haften, wenn die der letzten Bilder im Kreise schon hervorgerufen sind. Ist aber die Flamme discontinuirlich, in sehr raschem Wechsel bald verloschen, bald neu entzündet, so können nicht an allen Stellen des Bildkreises Flammenbilder stehen; der feurige Kreis ist nicht zusammenhängend, sondern besteht aus deutlich getrennten Funken. Einen solchen Kreis feuriger Perlen sieht man aber, wenn sich in dem beschriebenen, gedrehten Spiegel eine singende Flamme spiegelt; folglich ist diese Flamme discontinuirlich, sie verlischt jeden Augenblick, um sofort wieder aufzuglühen. Diese optische Analyse der singenden Flammen spricht folglich sehr für die Erklärung des Tones durch kleine Explosionen; auch ist diese Ansicht am meisten verbreitet und wird von dem großen Namen Faraday getragen. Indessen ist nach derselben nicht erklärlich, daß die Zeit zwischen zwei Explosionen, wie es nach der Wellentheorie sein muß, sich so genau an die Zeit für eine Longitudinalwelle der Luftsäule in der Glasröhre anschmiegt. Aus diesem und anderen Gründen gibt es noch mehrere Erklärungsweisen. So meint Tyndall, daß durch die Reibung des Luftstromes an der Flamme (siehe 254.) ein Geschwirre von Bewegungen entstehe, von denen leicht eine den für die Röhre passenden Rythmus besitzen und daher die Luftsäule in stehende Wellen versetzen könne, welche alsdann auf die Flamme in ähnlicher Weise zurückwirken dürften, wie die Wellen in einer Zungenpfeife auf die Zunge. Schrötter sieht die Ursache des Tones in einem von ihm beobachteten Zurückschlagen und Wiederaufsteigen der Flamme, was durch wechselnde Verdünnung und Verdichtung des Gasstromes hervorgerufen werde; Grailich und Weiß (1858) sehen die Stoffänderungen, die durch die Verbrennung entstehen, als die Ursache von Unruhen um die Flamme herum an, welche die Schwingungen anregen könnten. Sondhauß (1860) sucht die Oscillationen

schon in dem Ausflußrohre, welche durch Stöße die Luft in dem Klangrohre in Schwingungen versetzen müßten. Nach Terquem (1868) bringt der Luftstrom Aenderungen an der Flamme hervor, die ein ungleichmäßiges Einströmen der Luft zur Folge haben; dadurch entständen Schwingungen, die an dem Ende der Röhre reflectirt würden und mit neuen zu stehenden Wellen interferiren müßten; diese stehenden Wellen brächten dann auch das Flackern der Flamme hervor. Es sind also über diesen Gegenstand die Acten noch nicht geschlossen.

Interessante Erscheinungen treten beim Zusammenwirken zweier Flammen in einer Röhre auf. Läßt man eine Flamme gegen die andere reiben, so können verschiedene musikalische Töne entstehen, von denen einzelne einer Trompete, andere denen einer Lerche gleichen (Tyndall 1869). In manchen Fällen regen die Flammen einander an. Mauritius (1873) brachte in eine Röhre 2 Flammen, von denen die eine von oben herab brannte; dieselbe gerieth in die höchste Unruhe, wenn die zweite von unten genähert und eingeschoben wurde; sie gab abwechselnd die Obertöne, bis sie auf dem Grundtone gleichzeitig mit der unteren tönend zur Ruhe kam. Dieses gegenseitige Anregen beider Flammen findet selbst statt, wenn keine von beiden für sich durch irgend ein Mittel zum Tönen zu bringen ist. Kastner (1873) beobachtete, daß zwei neben einander in einer Röhre brennende und tönende Flammen schweigen, wenn man sie einander bis zur Berührung nähert; er gründete darauf ein Instrument, Pyrophon genannt, in welchem beim Niederdrücken einer Taste irgend eines von den zahlreichen Röhrenflammenpaaren getrennt und dadurch zum Tönen gebracht wird; der Klang des Instrumentes soll dem der Menschenstimme sehr ähnlich sein.

Barry (1872) hat eine Einrichtung zur leichten Bildung sensibler Flammen angegeben; über einen Ring, welcher etwa 4″ oberhalb eines Speckssteinbrenners angebracht ist, wird ein feines Drahtnetz gezogen und das Gas über demselben entzündet. Diese etwa 4″ hohe Flamme ist nicht blos höchst sensibel, sondern kann auch nach Geyer leicht singend und schweigend gemacht werden. Besonders empfindlich ist sie, wenn man auf das Drahtnetz eine mäßig weite Röhre leicht über die Flamme setzt. Hebt man das Netz mit der Röhre, so verkleinert und verdunkelt sich die Flamme, fängt aber an, mit gleichmäßigem, lautem Tone zu singen. Geht man mit dem Netze wieder so weit herab, daß die Flamme eben schweigt, so fängt sie bei jedem Geräusche an zu singen, hört aber auch mit diesem auf. Rückt man die singende Flamme etwas zur Seite, bis sie die Röhrenwand berührt, so wird der Ton etwas tiefer, schweigt aber bei jedem fremden Geräusche, und klingt fort, wenn diese verstummen. Diese Versuche zeigen unverkennbar einen Zusammenhang zwischen singenden und sensiblen Flammen.

Weniger wichtige Tonquellen. 254 1. Drehende Schwingungen der Stäbe. Werden glatte Glas-, Holz-, oder Metallstäbe mit einem feuchten oder beharzten Lappen in kreisförmigen Bahnen gerieben, so entsteht ein Ton, dessen Schwingungszahl 0,6 von derjenigen des Longitudinaltones beträgt, der also etwa eine Sexte tiefer ist als dieser. — 2. Reibungstöne. Die Reibung besteht in dem Stoßen der Hervorragungen oder auch der Theilchen eines Körpers gegen die hervorragenden Theilchen eines anderen Körpers, an welchem der erste sehr nahe vorbeigeht; meistens sind die Hervorragungen ungleich, folglich sind auch die Stöße verschieden und es entsteht ein Geschwirre von Bewegungen, die das Reibungsgeräusch bilden; dasselbe wird nur dann zu einem erkennbaren Tone, wenn der eine Körper durch die Elasticität des anderen in regelmäßigen Pausen zurückgeworfen wird und nach jeder Pause einen gleichmäßigen Stoß auf denselben ausübt; folgen diese Stöße nicht sehr schnell, wie z. B. wenn ein Stück Kreide unter stumpfem Winkel bei nicht allzustarkem Drucke auf einer Tafel vorangestoßen wird, wobei die einzelnen Stöße durch eine punktirte weiße Linie zu erkennen sind, so entsteht kein Ton; erfolgen aber bei stärkerem Drucke die Stöße sehr schnell, so entsteht der bekannte, schrille Ton, dessen Figurenbild, die Kreidelinie, leicht als aus schmalen Streifen zusammengesetzt erkannt werden kann. In derselben Weise entstehen Töne, wenn man mit befeuchtetem Finger fest über eine Fensterscheibe fährt, oder mit benetztem Kork über eine Glasscheibe, oder mit einem Nagel, einem Messer über eine harte Platte, oder mit einem Diamant über eine Glastafel; in den letzten Fällen graben die Töne ihr Bild in Form von Linien in die Platte ein, welche aus feinen Rillen zusammengesetzt sind, wie Kraß und Landois (1873) durch mikroskopische Untersuchungen gefunden haben; die Zahl der Rillen läßt auch die Schwingungszahlen dieser Schrilltöne erkennen. Dieselben Schrilltöne treten auch ein bei Bewegungen in ungeölten Maschinen, Pumpen, Thüren, beim Bremsen von Bahnzügen. Allein auch das Geschwirre des Reibungsgeräusches enthält jedenfalls einzelne bestimmte Töne, die man z. B. beim Fahren in einem Bahnzuge mit einiger Aufmerksamkeit oder mit bewaffnetem Ohre hören kann; im letzten Falle hört man selbst im Tagesgeräusche Töne. Eine Flintenkugel erzeugt durch Reibung an der Luft, der Wind durch Reibung an den Bäumen, ein rasch bewegtes Licht durch Reibung an der Luft Töne, ein

Luftstrom durch Reibung an dem scharfen Rande eines Messers, an den Kanten eines schmalen Spaltes, an der Mündung eines Schlüssels oder an der Lippe einer Pfeife einen Ton oder ein Tongeschwirre. Enthält das Tongeschwirre den Ton einer ganz nahen Röhre, so muß dieselbe tönen, weil jener Ton die Luftsäule der Röhre in stehende Schwingungen versetzt; ein anderer Ton kann dies nicht vollbringen, weil die von demselben erzeugte Verdichtung bei ihrer Rückkehr durch eine Verdünnung aufgehoben wird. In dieser Weise erklärt Tyndall die Tonbildung in Lippenpfeifen und in der chemischen Harmonica. Die Frankfurter Gitterbrücke tönt, wenn in ihrer Nähe geschossen wird; Telegraphendrähte tönen durch leichten Wind, wie die Aeolsharfe; diese besteht aus einem Resonanzboden, über welchen mit gleicher, schwacher Spannung 6—10 gleiche Saiten gezogen sind; werden dieselben vom Winde getroffen, so entstehen durch die Schwingungen der Saiten im Ganzen oder in gleichen Theilen Grundtöne und harmonische Obertöne, die sich zu weichen Accorden verbinden. — 3. Töne von Flüssigkeiten. Die Sirene tönt auch im Wasser; Cagniard-Latour brachte Flüssigkeitsäulen, die in Glasröhren eingeschlossen waren, dadurch zum Tönen, daß er die Glasröhren longitudinal rieb. Werthheim blies eine im Wasser liegende offene Labialpfeife mit Wasser an und erhielt neben dem Grundtone die 5 ersten harmonischen Obertöne; die Schwingungszahl des Grundtones entsprach der Formel $n = c : 2l$, worin aber c nicht gleich der vollen Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles im Wasser = 1424ᵐ ist, sondern nur $= 1424 \cdot \sqrt{2/3}$. Diese Verringerung erklärt Wertheim daraus, daß durch einen Druck auf eine Flüssigkeitsäule, wie auf einen Stab, eine Volumenveränderung und dadurch eine Aenderung der Dichtigkeit stattfinde; hierdurch ändere sich auch c nach der Formel $c = \sqrt{(e : d)}$, welche Veränderung nach Werthheims Versuchen durch Multiplication mit $\sqrt{2/3}$ ausgedrückt wird. Aus der Formel für n folgt demgemäß, daß der Grundton der Wasserpfeife 3mal soviel Schwingungen macht als derjenige einer Luftpfeife von gleicher Länge. Es wurde schon (249.) angegeben, daß Helmholtz diese Erklärung von Wertheim bestreitet und daß Kundt die Helmholtz'sche Erklärung bestätigt. Das entgegengesetzte Verhalten zeigen die Ausflußtöne von Savart und Sondhauß. Der erstere bemerkte eigenthümliche, weiche Töne beim Ausfließen von Wasser aus kurzen Ansatzröhrchen von gefüllten Gefäßen und fand die Schwingungszahl der Wurzel aus der Druckhöhe und umgekehrt der Länge der Röhrchen proportional. Aehnliches fand Sondhauß, als er Wasser oder Luft durch eine Oeffnung in einer dünnen Wand strömen und den Strahl in einiger Entfernung durch eine congruente Oeffnung gehen ließ; die Wasser- und Luftstrahlen geriethen dann durch Reibung an den Oeffnungen in Schwingung; doch zeigten sich hier die Wassertöne tiefer und schwächer als die Lufttöne. — 4. Töne durch Wärme. Trevelyans Wackler, siehe 237. Ein glühendes Drahtnetz in einer Röhre bringt dieselbe zum Tönen. Wird eine sehr enge mit einer Kugel endigende Glasröhre erhitzt, so entsteht ein Ton, weil die sich ausdehnende Luft nicht leicht entweichen kann und sich daher an der adhärirenden Luft reibt. Die durch Erwärmen von Flüssigkeiten aufsteigenden Luftbläschen erzeugen einen Ton. Memnons Säule (?). — 5. Elektromagnetische Töne. Wird um einen Stab von weichem Eisen ein Draht in vielfachen Windungen geleitet, so entsteht in dem Stabe der Longitudinalton, wenn in dem Drahte ein elektrischer Strom geschlossen oder geöffnet wird. Auch in Röhren von Eisenblech, die um den Draht gelegt sind, entstehen Töne; Röhren von anderen Metallen tönen, wenn dieselben der Länge nach einen Schnitt haben, dessen Ränder sich berühren. — 6. Der Brummkreiselton entsteht dadurch, daß die Luft in dem Kreisel mit demselben rotirt und vermöge ihrer Centrifugalkraft an der Seite der Oeffnung, nach welcher sie strömt, austritt, daß aber dann an der anderen Seite Luft einströmt, die das Luftvolumen anbläst. Der Ton ist um so tiefer, je größer das Luftvolumen, je kleiner die Oeffnung und je dicker (beim Holzkreisel) die Wand ist. Der Brummton der Ventilatoren und der Dampfausblaserohre. — 7. Der Dampfpfeifenton. Wird der Dampf mittels des Hahnes a (Fig. 140) in den Hohlkugelraum b gelassen, so strömt er durch den schmalen ringförmigen Spalt zwischen dem Rande c der Hohlkugel und dem Rande d einer kreisförmigen, diese halbe Hohlkugel fast zudeckenden Scheibe aus und trifft dann auf die scharfe Schneide der Glocke g; die hierdurch erzeugten Schwingungen der Glocke geben den durchdringenden schrillen Ton. — 8. Insectentöne. Nur wenige Insecten haben Stimmen: die Maikäfer haben in ihrem Tracheenverschluß eine Zunge, die Immen und Fliegen ein Häutchen, die Cycaden in einer Bauchtrommel zwei Häutchen, welche durch Luftströme zum

Fig. 140.



Tönen kommen. Oefter finden sich Tonerzeugung durch Reibung: das Heimchen reibt seine Deckflügel an einander, die Feldheuschrecke reibt ihre gezahnten Hinterschenkel über eine Leiste der Flügeldecke, die Bockkäfer reiben die innere Randkante der Vorderbrust, indem sie sich fortwährend bücken, über einen Fortsatz der Mittelbrust; die geriebene Stelle enthält nach Kraß und Landois (1873) Rillen, wodurch sich die Entstehung dieser Schrilltöne erklärt. Die Zahl der Rillen auf einer gewissen Strecke und der Reibungsstriche auf denselben läßt die Schwingungszahl berechnen; so enthält der Ton des männlichen Moschusbocks 2141 Schw. Fliegen, Mücken, Bienen u. A. erzeugen auch einen Flugton

255 **Das Mittönen** (Savart 1837). Die Resonatoren (Helmholtz 1863). Unter dem Mittönen versteht man die Erscheinung, daß ein tönender Körper einen ruhenden zum selbständigen Tönen anregen kann. Wie sich nämlich die Schallschwingungen eines Körpers auf die ihn umgebende Luft übertragen, so theilen sie sich auch anderen Körpern mit, die mit dem tönenden Körper in Verbindung stehen, und so theilt auch die schwingende Luft ihre Tonbewegung den Körpern mit, welche sie berührt. Sind solche Körper begrenzt, so können die an den Grenzen reflectirten Wellen mit neu voranschreitenden zu stehenden Wellen interferiren, wodurch selbständiges Tönen entsteht. Dies kann sowohl durch einen einzelnen Ton wie auch durch ein Tongemisch stattfinden. Ein Tongemisch kann einen Körper nur dann zum Mittönen bewegen, wenn einer der Theiltöne des Tongemisches in seiner Tonhöhe oder Schwingungsdauer übereinstimmt mit einem der Töne, die der Körper bei selbständigem Tönen vermöge seiner Dimensionen und seiner Elasticität entwickeln kann.

Beweis. Wenn die Schallschwingungen eines Theilchens, die bekanntlich viel größer und massiger als die Licht- und Wärmeschwingungen sind, nicht in einem anderen Theilchen Schwingungen von gleicher Dauer hervorrufen können, so kann überhaupt keine Tonübertragung stattfinden, die Bewegung wird dann wohl meist in Wärme verwandelt. Denn würde das zweite Theilchen schneller als das erste schwingen, so wäre es schon auf dem Rückwege, wenn das erste Theichen noch vorangeht, und durch Aufeinanderstoßen der Theilchen würde die große Schallschwingung in kleinste Erzitterungen verwandelt; wäre die Bewegung des zweiten Theilchens die langsamere, so wäre dasselbe noch auf dem Rückwege, wenn das erste schon wieder vorangeht, und der Erfolg wäre derselbe. Stimmen aber die Perioden beider Theilchen überein, so kann das erste bei jeder Schwingung in gleichem Sinne auf das zweite wirken und demselben allmälig eine starke Bewegung verleihen; so können Luftschwingungen feste Körper zum Tönen bringen und Aetherschwingungen wägbare Körper erwärmen. Ist nun ein Theilchen eines Körpers durch Tonschwingungen in gleiche Schwingungen versetzt, so müssen dieselben bekanntermaßen fortschreitende Wellen erzeugen, welche an den Grenzen des Körpers reflectirt werden. Diese reflectirten Wellen können aber mit neu fortschreitenden Wellen nur dann zu tönenden, d. i. stehenden Wellen interferiren, wenn ihre Längen in einfachem Verhältnisse stehen zu dem Wege, den sie von einer Grenze des Körpers bis zur anderen zu durchlaufen haben; denn nur dann sind die Ausgangspunkte der reflectirten Wellen um 1, 2, 3 . . . Wellenlängen von den Anfangspunkten der directen Wellen entfernt, nur dann können also (nach 227.) stehende Wellen entstehen. Ganz dieselben Verhältnisse für die ganz gleichen Schwingungen finden auch bei dem tonerregenden Körper statt; folglich müssen die beiden Körper in Bezug auf den zu übertragenden Ton gleichgestimmt sein. Indessen ist es hierbei nicht nothwendig, daß der erregende Körper nur den einen Ton enthalte; vielmehr kann die Schwingungsbewegung desselben eine mannichfach combinirte sein; denn nach Fouriers Gesetz (228.) zerlegt sich eine solche zusammengesetzte Bewegung immer in ihre elementaren Theilbewegungen, und zwar dann, wenn sie auf Körper trifft, die nur diese Theilbewegungen ausführen können. Hieraus folgt: irgend ein Theilton eines Tongemisches regt einen Körper nur zum Mittönen an, wenn derselbe mit irgend einem Eigentone, sei es Grund-, Ober- oder Nebentone des Körpers übereinstimmt.

Nachweise. Hat man zwei ganz gleiche Stimmgabeln auf hohlen, offenen Holzkästchen befestigt und streicht die eine an, so tönt die andere mit, selbst wenn sie in größerer Entfernung steht; macht man aber durch Aufkleben eines Stückchens Wachs auf eine Gabel dieselbe ein wenig tiefer, so findet das Mittönen nicht mehr statt. — Singt man gegen ein Klavier oder ein anderes Saiteninstrument einen auf demselben möglichen Ton, so klingt derselbe lebhaft in dem Instrumente nach; daß derselbe von der betreffenden Saite

ausgeht, kann man leicht durch Reiterchen sehen oder an dem Erlöschen des Tones bei der Berührung der Saite bemerken. — Hat man auf dem Monochord zwei gleich gestimmte Saiten, so springen Reiter von der einen, wenn die andere tönt, was bei Ungleichheit der Stimmung nicht stattfindet; läßt man mittels des Steges nur einen Oberton der ersten Saite erklingen, so springen die Reiter von der zweiten Saite wohl an den Bäuchen, aber nicht an den Knoten herab. — Auch Pfeifen, Glocken, Gläser klingen kräftigen Stimmen nach; eine besonders kraftvolle Stimme vermag Gläser entzwei zu schreien. Die hohen Töne der Streichinstrumente bringen Jodstickstoff zur Explosion. — Besonders lehrreich ist der Versuch mit Stimmgabel und Cylinder in 250. — Bringt man nach Planeth (1871) eine schwingende Stimmgabel in die Nähe einer Lichtflamme, so wird durch das Mittönen derselben der Ton der Gabel bedeutend verstärkt, am meisten, wenn die Flamme zwischen die Gabelzinken gebracht wird. — Ist in einem Tongemische ein Ton noch so schwach und dadurch dem Ohre unmerkbar, so erklingt derselbe stark, wenn das Tongemisch auf eine für jenen Ton abgestimmte Luftsäule oder ein anderes Luftvolumen trifft, das direct auf das Ohr wirken kann. Hierauf beruhen die wichtigen Resonatoren von Helmholtz; sie bestehen aus Glas- oder Messingkugeln, die einen kegelförmigen Ansatz von der Form der Mündung des Gehörganges tragen, sowie diesem gegenüber eine größere Oeffnung. Steckt man einen solchen auf einen gewissen Ton abgestimmten Resonator ins Ohr, so hört man den Ton häufig im Tagesgeräusche; ist er aber, wenn auch noch so schwach, in einem erregten Tongemische enthalten, so schmettert er heftig ins Ohr, während er demselben vorher vielleicht unvernehmbar war. Kräftiger wirken die conischen Resonatoren von Appunn.

256 **Die Resonanz** (Gebrüder Weber 1825). Unter Resonanz versteht man die Anwendung des Mitschwingens zur Verstärkung schwacher Töne. Töne klingen schwach, wenn der Tonerreger kleine Oberflächen hat, also auch nur eine geringe Luftmenge in Bewegung zu setzen vermag, und wenn der Ton aus dem Tonerreger in ein ganz anderes Medium übergehen muß, wobei die Bewegung an Stärke wesentlich verliert. So klingt eine Stimmgabel für sich allein angeschlagen sehr schwach; Saiten an Bleiklötzen befestigt geben kaum hörbare Töne; dagegen die Blasinstrumente, in welchen eine große Luftsäule den Ton bildet, haben an sich einen starken Klang. Um nun in jenen Fällen den Ton zu verstärken, verbindet man die Tonerreger mit größeren, trockenen elastischen Holztafeln, oder auch mit Holzkasten, die eine größere Luftmenge einschließen; es gehen alsdann die Schwingungen des Tonerregers auf die Holztafeln über, dieselben schwingen mit oder resoniren, und setzen wegen ihrer größeren Oberfläche eine größere Luftmenge in Bewegung, wodurch der Ton bedeutend verstärkt wird. Man nennt diese Holztafeln den Resonanzboden; bei der Resonanz von Holzkasten, die man ebenfalls Resonanzböden nennt, wirkt zur Verstärkung des Tones auch wesentlich das eingeschlossene Luftvolumen mit, da dasselbe durch sämmtliche umliegenden Wände in Schwingungen versetzt wird und dieselben leicht an die äußere Luft übertragen kann. Durch das Mitschwingen wird nach der goldenen Regel der Mechanik zwar die Dauer des Tönens verkürzt, die Höhe aber bleibt (nach 225) unverändert; sonst wäre auch die Anwendung desselben zur Resonanz unmöglich.

Die Resonanz ist sehr nahe verwandt mit dem Mittönen, aber nicht mit demselben identisch, dies geht schon daraus hervor, daß Resonanzböden in demselben Moment schweigen, in welchem der Tonerreger verstummt, während der mittönende Körper in diesem Falle forttönt. Auch liegt darin ein Unterschied, daß ein Resonanzboden für alle Töne resonirt, während der mittönende Körper für seine Töne absolut genau gestimmt sein muß und nur diese resonirt; indessen ist bei Platten ein genaues Abstimmen für das Mittönen ebenfalls nicht unumgänglich, weil Platten (nach 248.) viele Eigentöne haben und daher auch vielfach mittönen können. Aber als Resonanzboden würde doch eine nur mittönende Platte nicht ausreichen, weil sie nur einer beschränkten Zahl von Tönen antwortet, während der Resonanzboden ebenso wie das resonirende Luftvolumen jeden Ton verstärken muß; doch werden auch für höhere Instrumente, wie Violinen, die Resonanzkasten klein und für tiefere, wie Baßgeigen und Pauken, groß gemacht, wie auch die tiefere Pauke größer ist als die höhere. Wenn also auch die Resonanzkasten einige Verhältnißmäßigkeit zu ihrem Tonumfange haben, so tönen sie doch unweigerlich jedem Tone entgegen: also muß die Resonanz auch in ihrem Wesen vom Mittönen verschieden sein. Nach Weber schwingen die Theilchen eines mittönenden Körpers weiter, weil der mitgetheilte Ton ihnen natürlich,

weil der Körper darauf abgestimmt ist; bei resonirenden Körpern aber, deren Theilchen ein bestimmter Ton aufgezwungen ist, hört jede Schwingung sogleich auf, dauert also nur fort, wenn und solange die tonerregenden Schwingungen anhalten und anregen. Durch diese fortwährend erregten Schwingungen entstehen fortschreitende Wellen, die an den Grenzen nur unvollständig reflectirt und daher wohl von neuen fortschreitenden Wellen aufgehoben werden, ohne diese selbst aufheben zu können; dadurch ist die Bildung neuer reflectirter Wellen möglich, die bei der Rückkehr dasselbe Schicksal haben, aber doch immer neuen Wellen Platz machen, so lange die Tonerregung fortdauert.

Nachweise. Verbindet man zwei gleiche Platten durch einen Stab, so entsteht auf der einen dieselbe Resonanzfigur, die sich auf der anderen beim Anstreichen derselben als Klangfigur bildet; sind die zwei Platten von verschiedener Größe und liegen sie in einer Ebene, so entsteht beim Anstreichen der kleineren eine Figur, die man an keiner von beiden für sich allein erhalten kann. — Ist eine Saite als Verlängerung an einer Holzplatte befestigt, so entstehen beim Anstreichen der Saite Resonanzfiguren, die weniger regelmäßig als die Klangfiguren ausfallen; beim senkrechten Striche hüpfen die Sandkörner, beim longitudinalen Tone gleiten sie nur. — Wheatstones unsichtbares Concert. — Zierliche Resonanzfiguren entstehen auf gespannten Membranen, wenn man in der Nähe derselben Stimmgabeln oder Orgelpfeifen zum andauernden Tönen bringt. — Eine kaum hörbare Stimmgabel tönt stark, wenn man sie mit einem Stiele auf einen Tisch oder ein Klavier setzt oder auf einen Resonanzkasten befestigt. — Die Klaviersaiten übertragen durch Stahlstifte, die sie berühren, ihre Schwingungen auf den Steg und durch diesen auf den Resonanzboden; ebenso geschieht die Uebertragung bei Streichinstrumenten; Guitarren klingen schwach, weil der Steg fehlt.

Das Gehörorgan. Das Organ des Gehöres gehört ebenfalls in die Betrachtung der Tonerreger, weil ohne dasselbe eine Tonempfindung unmöglich ist, und weil seine Wirkung auf den Gesetzen des Mitschwingens beruht. Das menschliche Gehörorgan besteht aus dem äußeren, mittleren und inneren Ohre. Das äußere Ohr sammelt und leitet mittels der durch vielfache Windungen eine größere Oberfläche darbietenden Ohrmuschel die Schallschwingungen in den Gehörgang, einen etwa 1″ langen Kanal in dem Schläfenbein. Der Gehörgang ist hinten durch das Trommelfell geschlossen, mit welchem das mittlere Ohr oder die Paukenhöhle beginnt, die durch die Eustachische Röhre mit der Rachenhöhle in Verbindung steht, also mit der äußeren Luft communiciren kann. In der Paukenhöhle liegen die vier Gehörknöchelchen, der an dem Trommelfell befestigte Hammer, an welchen sich der Ambos schließt, der durch das linsenförmige Knöchelchen mit dem Steigbügel in Gelenkverbindung steht. Durch diese Knöchelchen erhalten die Luftschwingungen, welche mittels des Trommelfelles denselben mitgetheilt werden, nach den Gesetzen der Resonanz eine größere Stärke; durch den Verlust des Trommelfelles und der Knöchelchen ist das Gehör nicht aufgehoben aber bedeutend geschwächt. Die Trommelhöhle ist von dem inneren Ohre, dem sogenannten Labyrinth, das in dem Felsenbeine eine Höhlung bildet, durch eine knöcherne Scheidewand getrennt, in welcher zwei mit Haut überzogene Oeffnungen, das runde und das ovale Fensterchen, eine Verbindung mit der Paukenhöhle herstellen. Der Steigbügel, der sich an das ovale Fensterchen schließt, theilt die Tonschwingungen diesem und dadurch dem Wasser mit, welches das ganze Labyrinth erfüllt und sich schwingend voran- und zurückbewegen kann, weil das runde Fensterchen, mit welchem das Labyrinth endigt, auszuweichen vermag. Das Labyrinth besteht aus dem Vorhofe, den drei Bogengängen und der Schnecke; in den beiden ersten Theilen schwimmt in gleicher Form, aber mit geringeren Dimensionen, das häutige Labyrinth, das ebenfalls mit Wasser erfüllt ist; indessen scheidet sich der häutige Vorhof in zwei Säckchen, das runde und das ovale Säckchen, und die häutigen Bogengänge sind an ihrem Beginne angeschwollen, die sogenannten Ampullen. Die Schnecke ist durch eine Scheidewand innerhalb der ganzen Länge des Kanals in zwei Abtheilungen zerlegt, die Vorhoftreppe und die Paukentreppe, von denen die erste am Vorhofe beginnt und die letzte am runden Fensterchen endigt. Die Scheidewand besteht der halben Breite

257

nach aus einem knöchernen Leisten und ist in der äußeren halben Breite eine Membran. Der vom Gehirne kommende Gehörnerv zertheilt sich im Labyrinth in mehrere Aeste, von denen Zweige nach den Ampullen und den Säckchen gehen; die Fasern der ersten Zweige durchdringen die Ampullenhaut und vertheilen sich auf der Innenfläche derselben zwischen den Wurzeln steifer elastischer Haare (Max Schultze), deren Schwingungen hierdurch leicht die Nervenenden reizen können. Die Fasern der Säckchenzweige, die sich ebenfalls auf der Innenfläche der Säckchenhaut vertheilen, sind theilweise von locker liegenden Kryställchen bedeckt, den Hörsteinchen oder Otolithen; während diese sehr geeignet erscheinen, durch ihre Masse auch die leisesten und vorübergehendsten Geräusche zur Empfindung zu bringen, mögen Schultzes Härchen mehr für stärkere und dauernde Schallarten genügen. Für die Empfindung der Töne dagegen ist nach Helmholtz die Membran der Schneckenscheidewand mit den Corti'schen Bögen bestimmt. Diese Membran ist nämlich doppelt und enthält einen verhältnißmäßig hohen Zwischenraum, die sogenannte Mitteltreppe; die untere Membran (**membrana basilaris**) besteht aus festen radialen Fasern, die an Länge fortwährend zunehmen, und in ihrer Länge viel stärker gespannt sind, als sie in der Breite zusammenhängen; auf diesen Fasern erheben sich die Corti'schen Bögen, schief aufsteigende Stäbchen ebenfalls von verschiedener Länge, nach Kölliker wohl 3000, die an ihrem oberen Ende durch lose kleine Stücke mit absteigenden Platten zusammengelenkt sind, welche gerade bis an den Rand der knöchernen Leiste herabgehen; an oder in diese Corti'schen Bögen treten die Fasern des Hörnervzweiges, welcher der Schnecke zugetheilt ist. Die Fasern der **membrana basilaris**, an Zahl wohl der der Corti'schen Bögen gleich, sind es, welche die Töne percipiren; denn sie sind trotz ihrer Kleinheit auf die gewöhnlichen Töne abgestimmt, da sie mit den Bögen belastet sind. Wegen dieser Belastung und wegen ihrer Breite verhalten sie sich indeß nicht ganz wie Saiten, sondern eher wie stabförmige Platten; sie sind wohl hauptsächlich auf e i n e n Ton, aber auch auf diejenigen Tone abgestimmt, die diesem Grundtone nahe kommen.

Wenn daher ein Tongemisch durch die Schwingungen des Steigbügels und des Labyrinthwassers an die **membrana basilaris** gelangt, so werden von deren Fasern nur diejenigen zum Mitschwingen gebracht, deren Eigenton in dem Tongemische genau oder nahezu enthalten ist; hierdurch werden diejenigen Fasern der Gehörnerven gereizt, die an die betreffenden Corti'schen Bögen herantreten; dieser Reiz pflanzt sich in das Gehirn fort und erweckt dort einen Eindruck, den wir mit Ton und Tonhöhe bezeichnen. Hieraus ergibt sich das schon von G. S. Ohm (1840) durch Versuche gefundene Gesetz: das menschliche Ohr vermag nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einen einfachen Ton zu empfinden, und zerlegt jede andere periodische Luftbewegung in eine Reihe von pendelartigen Schwingungen und empfindet eine diesen entsprechende Reihe von Tönen. Beginnen und endigen diese Töne zu gleicher Zeit, ohne an Stärke zu wechseln, und stehen sie in einfachem Verhältnisse ihrer Schwingungszahlen zu einander, so daß sie keine Stöße erzeugen, dann werden dieselben für unsere Wahrnehmung in ein Ganzes verschmolzen; besonders ist dies der Fall, wenn die Tonmischung von einem einzigen Tonerreger ausgeht, weil wir uns für diesen Fall gewöhnt haben, sie als einen einzigen Ton anzusehen; doch kann man bei gespannter Aufmerksamkeit und nach richtiger Anleitung die einzelnen Partialtöne in der Tonmischung unterscheiden, weil eben die Tonempfindung diese Zerlegung selbst vornimmt.

258 **Die Obertöne und Nebentöne** (Helmholtz 1863). Unter Nebentönen versteht man diejenigen Töne, die ein Tonerreger noch außer seinem Grundtone entwickeln kann; sind dieselben höher als der Grundton, wie es gewöhnlich der Fall

ist, so nennt man sie Obertöne. Vollbringen die Obertöne 2, 3, 4 .... mal so viel Schwingungen als der Grundton, so werden sie harmonische Obertöne genannt. Bei der Betrachtung der Tonerreger wurde gezeigt, daß dieselben außer ihrer einfachsten Schwingungsart, bei welcher sie meist als Ganzes schwingen und ihren Grundton erzeugen, auch noch in einzelnen Theilen schwingen können; durch diese Schwingungsarten nun werden die Nebentöne hervorgerufen. Es ist nun hier hinzuzufügen, daß nur höchst selten die einfachste Schwingungsart für sich allein hervorgerufen werden kann, sondern daß die anderen Schwingungsarten meist gleichzeitig mit entstehen; die Grundtöne treten in Verbindung mit ihren Nebentönen auf.

Die Ursache dieser wichtigen Erscheinung liegt in der Art unserer Tonerregung, die in den meisten Fällen eine gewaltsame ist. Wir zupfen, schlagen, reißen reibend die Saiten, wir blasen die heftigsten Luftströme gegen ruhende Luftsäulen, wir stoßen Stimmgabeln auf, wir schlagen auf Platten, Glocken und Membrane oder reiben sie heftig. Da nun die verschiedenen Theilchen durch diese Einwirkungen in der verschiedensten Weise getroffen werden und außerdem einer äußeren Einwirkung in verschiedener Weise widerstehen, so müssen sie auch verschiedene Bewegungen erhalten, es müssen Schwingungen von den verschiedensten Perioden entstehen. Jede Schwingung erzeugt aber in einer Schwingungszeit eine ganze fortschreitende Welle, die Schwingungen von großer Dauer lange Wellen, die von kurzer Dauer kleine Wellen. Diejenigen Wellen, die zu den Dimensionen des Körpers in verwickelten oder incommensurabeln Verhältnissen stehen, werden durch ihre eigenen reflectirten Wellen aufgehoben; diejenigen Wellen aber, welche in einfachem Verhältnisse zu den Dimensionen des Körpers stehen, die z. B. die 2, 1, $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ . . . . fache Länge von einer Saitenlänge haben, bilden durch Interferenz mit den reflectirten Wellen stehende d. i. tönende Schwingungen. Hieraus ist ersichtlich, daß für die Entstehung kleinerer stehenden Wellen die Wahrscheinlichkeit nicht geringer ist als für die größere des Grundtones, daß also die Obertöne meist gleichzeitig mit den Grundtönen auftreten. Die Beschaffenheit der Körper und die Art der Tonerregung entscheidet, ob viele oder wenige Nebentöne entstehen, ob die höheren oder tieferen an Zahl oder Stärke vorherrschen, ob auch Longitudinaltöne bei der transversalen Erregung oder umgekehrt mitklingen u. s. w. — Die musikalischen Töne sind hiernach nicht einfache Töne, sie bestehen nicht aus einfachen, pendelartigen Hin- und Hergängen eines Körpers, nicht aus einer einzigen Schwingungszahl, sondern ihre Schwingungsart ist mannichfach zusammengesetzt, sie enthalten viele Schwingungszahlen, sie bestehen eigentlich aus mehreren innig mit einander verschmolzenen einfachen Tönen; Helmholtz schlägt deßhalb vor, für dieselben den Namen „Klänge" einzuführen, und unter Ton die eigentlich nie wahrnehmbare, sondern nur theoretisch denkbare Wirkung der einfachen pendelartigen Schwingungen zu begreifen.

Nachweis. Ist eine Flasche mit einem Membranboden z. B. auf fis_1 abgestimmt, so fliegt ein an derselben hängendes Kügelchen ab, oder auf derselben liegender Sand ordnet sich zu einer und derselben Resonanz-Figur, wenn die Töne fis_1, fis, h_{-1}, fis_{-1}, d_{-1} in in der Nähe erklingen, woraus folgt, das der Ton fis_1 der Flasche enthalten ist in dem Klange, fis, h_{-1}, fis_{-1}, d_{-1}, von denen er bezüglich der 1te, 2te, 3te, 4te Oberton ist. — Setzt man auf eine Klaviersaite ein Reiterchen, so wird dasselbe abgeworfen, wenn irgend eine Saite angeschlagen wird, zu deren Obertönen der Ton der ersten Saite gehört; z. B. c_1 wird erregt von c, f_{-1}, c_{-1}, as_{-2}, f_{-2}, d_{-2}, c_{-2}; dies beweist, daß c_1 in all diesen Tönen enthalten ist; das Anschlagen anderer Saiten läßt das Reiterchen in Ruhe. Nur wenn die Obertöne von c_1 selbst erklingen, also c_2, g_2, c_3 . . . oder ein Ton, der diese Obertöne enthält, so werden die Theile der c_1-Saite zum Mitschwingen gebracht; das Reiterchen regt sich in diesem Falle ebenfalls, nur dann nicht, wenn es auf einem Knoten sitzt. — Der beste Nachweis ist mit den Resonatoren zu führen, von denen man gewöhnlich Reihen hat, die auf die 19 ersten Obertöne eines Grundtones abgestimmt sind; schlägt man irgend einen Klang an, während man einen Resonator ins Ohr gesetzt hat, so schmettert ein Ton heftig ins Ohr, wenn der Resonatorton zu den Obertönen jenes Klanges gehört, während im gegentheiligen Falle das vom Tagesgeräusche herrührende Brummen des Resonators unverändert bleibt; so schmettert der Resonator c_2, wenn man die Töne c_1, f, c, as_{-1}, f_{-1}, d_{-1}, c_{-2} angibt. — Auch mit blosem Ohre kann man die Obertöne nach einiger Uebung hören: Man schlage auf dem Klavier z. B. g_1 an und lasse es verklingen; im Momente des Verklingens gebe man c kräftig an und richte die Aufmerksamkeit auf g_1, so wird man dasselbe in dem c hören. An einem anderen Saiteninstrument bringe man einen Flageoletton hervor, und schlage während des Verklingens

die Saite selbst an, so wird man in dem Saitentone den Flageoletton hören. Man könnte vielleicht den Einwand erheben, daß das Hören dieser Töne auf Einbildung beruhe oder daß dieselben durch die Einwirkung des Grundtones auf das Ohr erzeugt würden. Dies wird am besten durch die Thatsache widerlegt, daß man einen bestimmten Oberton durch kein Mittel hört oder sieht, wenn man denselben in dem Klange vernichtet hat. Man kann dies leicht dadurch erzielen, daß man einen Tonerreger in einem Knotenpunkte jenes Obertones erregt; denn nach Young (1800) werden alle Töne nicht erzeugt, die in dem angegriffenen Punkte einen Knoten haben. Zupfen wir z. B. eine Saite in ihrer Mitte, so fehlen dadurch alle geradzahligen Obertöne; man wird dieselben dann auch weder mit blosem, noch mit bewaffnetem Ohre hören, noch sie durch Reiter oder Flaschen nachweisen können. — Schlägt man eine Saite an und berührt sie dann in 1/2, oder 1/3, oder 1/4, so schweigt der Ton als Ganzes, die betreffenden Obertöne klingen aber als Flageolettöne nach, weil man sie durch das Berühren ihres Knotens nicht dämpfen kann; wären sie nicht vorhanden gewesen, so hätte durch die Berührung völliges Verstummen eintreten müssen. — Man kann auch umgekehrte Nachweise führen, indem man einem Grundtone seine Obertöne zumischt; sie vermischen sich dann zu einem für das gewöhnliche Ohr ein Ganzes bildenden Klange. Hat man zwei auf b und b_1 abgestimmte Flaschen (Flaschentöne enthalten fast keine Obertöne) und bläst sie gleichzeitig an, so kann man die beiden Töne nicht mehr unterscheiden. — Appunn in Hanau hat Obertöne-Apparate construirt, in denen durch Zungen die 32, 64 oder 128 ersten Obertöne der Grundtöne $c_{-1} = 64$, $c_{-2} = 32$ und $c_{-3} = 16$ angegeben werden können; läßt man alle oder eine größere Anzahl von Obertönen mit dem Grundtone erklingen, so macht das Tongemisch immer nur den Eindruck des Grundtones. Mittels der Resonatoren hört man alsdann die Theiltöne sehr stark, wodurch dieser Apparat sehr geeignet wird zum Einüben des Hörens mit den Resonatoren.

259 **Die Combinationstöne** (Sorge 1740; Helmholtz 1856). Man versteht unter Combinationstönen diejenigen Töne, welche durch das Zusammenklingen zweier Töne neu gebildet werden. Sie sind nicht etwa in den zwei Tönen schon vorhandene Ober- und Nebentöne, die sich beim Zusammenklingen gegenseitig verstärken; denn sie können meistens durch kein Mittel in den beiden einzelnen Tönen hörbar oder sichtbar gemacht werden, wenn dieselben auch noch so stark sind; dagegen treten sie beim Zusammentönen derselben sofort deutlich hervor, besonders wenn die zwei Töne recht intensiv gleichmäßig anhalten, wie bei der Physharmonica oder bei einer mehrstimmigen Sirene. Die Combinationstöne können objectiv oder auch nur subjectiv sein, d. h. sie können eine selbständige Existenz außerhalb des Ohres haben oder erst im Ohre entstehen; das erste ist der Fall, wenn die beiden Töne durch und in demselben Luftraume sich bilden, z. B. in einer mehrstimmigen Sirene, weil sie dann auch auf dieselbe äußere Luftmenge verändernd einwirken; das letzte findet statt, wenn die Erregungsstellen der beiden Töne ganz von einander getrennt sind und keinen mechanischen Zusammenhang haben. Die objectiven Combinationstöne kann man mit Resonatoren leicht hören oder durch Membrane sichtbar machen; für die subjectiven muß man das Ohr einüben. Die Combinationstöne sind entweder Differenztöne (Tartini'sche Töne) oder Summationstöne: Die Schwingungszahl der Differenztöne ist gleich der Differenz, die der Summationstöne gleich der Summe der Schwingungszahlen der beiden primären Töne.

Nachweis. Appunns Tonmesser enthält 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schwingungen per Sec. mehr gibt als die vorangehende; man kann dies schon daran erkennen, daß beim Anblasen von je zwei neben einander liegenden Zungen (266.) 4 Stöße entstehen. Bläst man 2 um 8 Zungen von einander entfernte Töne an, so hört man mit einem Resonator immer den Differenzton $c_{-2} = 32$; bläst man den tiefsten Ton $c = 128$ und die um 16 Zungen höher liegende Quinte $g = 192$ an, so hört man als Differenzton die tiefere Octave $c_{-1} = 64$ und den Summationston $e_1 = 320$. Läßt man auf Appunns Obertöneapparat die 2 Töne $c = 128$ und $g = 192$ erklingen, so hört man mit wenig geringerer Intensität den Summationston $e_1 = 320$ mitklingen; man hört den Accord $c : g : e_1$. Den Differenzton $c_{-1} = 64$ kann man nur dann beobachten, wenn man das Ohr leicht auf die Oberplatte des Apparates auflegt. Dieses früher nicht bekannte Vorwalten des Summationstones über den Differenzton tritt nach Appunns Beobachtungen

besonders bei den Combinationstönen hervor, die aus Tönen der kleinen und der ersten Hälfte der eingestrichenen Octave resultiren, während sonst mehr der Tartini'sche Ton vorwaltet.

Weil die Schwingungszahl der Differenztöne gleich der Zahl der Stöße ist, so glaubte man früher in ihnen die Wirkung dieser wegen ihrer großen Zahl einzeln nicht mehr wahrnehmbaren Stöße zu erkennen; da die Stöße aber durch Summirung zweier Töne entstehen, so müßten die Combinationstöne auch noch bei schwachen primären Tönen hörbar sein, was durchaus nicht der Fall ist; auch wäre hiermit der Summationston unerklärt. Aus diesen und anderen Gründen hat Helmholtz die frühere Erklärungsweise verlassen und gibt als Ursache der Combinationstöne eine Abweichung von Fouriers Gesetz an, welche dann eintritt, wenn die Schwingungsbewegungen große Amplituden haben. Sowie das Gesetz über die gleiche Dauer der Pendelschwingungen nur für sehr kleine Bogen gilt, so gilt auch das Gesetz von der Zerlegung zusammengesetzter Schwingungsbewegungen, daß nämlich eine zusammengesetzte Bewegung sich nur in die elementaren pendelartigen Bewegungen zerlege, aus denen dieselbe sich gebildet habe, nur für unendlich kleine Schwingungen; haben die Schwingungen aber größere Amplituden, so entstehen durch Aufeinanderstoßen der schwingenden Theilchen secundäre Schwingungsbewegungen; die Zahl der Schwingungen derselben ist entweder gleich der Differenz oder gleich der Summe der Schwingungszahlen der primären Töne. — Es gibt auch Combinationstöne der Obertöne, sowie solche der Combinationstöne mit den primären Tönen; doch sind dieselben sehr schwach; nach einiger Uebung sind sie auf dem Obertöne-Apparat zu erkennen.

260

Aufg. 402. Welchen Ton gibt eine 1^m^ lange, 1^mm^ dicke Saite, deren spec. G. = 1 ist, und welche durch 1^kg^ gespannt wird? Aufl.: Nach Fl. (33) ist $n = 56 = a_{-2}$. — A. 403. Wie muß diese Saite gespannt werden, damit sie e gebe? Aufl.: Mit 9^{kg}. — A. 404. Welchen Ton gibt sie bei 25^{kg}? Aufl.: cis_1. — A. 405. Was ist zu thun, damit sie bei dieser Spannung e_1 gebe? Aufl.: Steg in $^5/_6$. — A. 406. Welche Töne erhält man beiderseits, wenn man durch den Steg 10^{cm}, 20^{cm}, 30^{cm}, 40^{cm}, 50^{cm} abschneidet? Aufl.: 2800 und 311, also f_4 und dis_1; ebenso f_3 und f_1, b_2 und g_1, f_2 und b_1, cis_2 und cis_2. — A. 407. Wo muß man den Steg hinschieben, um die Töne der cis-dur-Tonleiter zu erhalten? Aufl.: 889, 800, 750, 667, 600, 533, 500^{mm}. — A. 408. Wenn eine Saite von 60^{cm} Länge und $0{,}6^{mm}$ Dicke den Ton c_1 gibt, welchen Ton gibt unter sonst gleichen Umständen eine Saite von 40^{cm} Länge und $0{,}8^{mm}$ Dicke? Aufl.: d_1. — A. 409. Eine Saite gibt g_1; welchen Ton gibt unter übrigens gleichen Umständen eine 3 mal weniger dicke Saite bei 4 mal kleinerer Spannung? Aufl.: d_2. — A. 410. Die Längen zweier Saiten sind 90 und 70^{cm}, die Dicken 0,8 und $1{,}2^{mm}$, die Spannungen 16 und 9^{kg}; wie verhalten sich die Schwingungszahlen? Aufl.: 14 : 9. — A. 411. Von 4 gleichen Metallstäben ist der eine 20^{cm}, die anderen 30, 40, 50^{cm} lang; welche Töne geben die letzteren, wenn der erste c_4 erzeugt? Aufl.: b_3, c_2, f_1. — A. 412. Wie viel Schw. macht ein cylindrischer, am einen Ende eingeklemmter Eisenstab von 10^{cm} Länge und 1^{cm} Dicke? Aufl.: Nach Fl. (34) ist $n = 1240$. — A. 413. Wieviel Schw. würde derselbe bei 1^{mm} Dicke machen? Aufl.: 124. — A. 414. Welchen Ton gibt der letzte Stab bei 5^{cm} Länge? Aufl.: 496, etwa h_1 (Versuch mit einer Stricknadel). — A. 415. Wenn der Stab von A. 413 mit 0, 1, 2, 3 Knoten schwingt, welche Töne gibt er dann? Aufl.: $124 = h_{-1}$, c_3, g_4, fis_5 c^a. — A. 416. Welches ist der longitudinale Grundton des Stabes in A. 412? Aufl.: Nach Fl. (35) ist $n = 11058$. — A. 417. Wie groß ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in jenem Eisenstabe? Aufl.: Nach Fl. (36) ist $c = 4\,l\,n = 4443^m$. — A. 418. Welchen Ton gibt eine gedeckte Lippenpfeife, deren Länge $= 2^m$ ist? Aufl.: Nach Fl. (37) ist $n = 42$. — A. 419. Wie groß berechnet sich hieraus die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft? Aufl.: Nach (37) oder (38) $c = 336^m$. — A. 420. Welches sind die Obertöne dieser Pfeife? Aufl.: h_{-1}, a, d_1, g_1 c^a ... — A. 421. Welche Töne erzeugen gedeckte Pfeifen von 5^{dm}, 2^{dm}, 1^{dm} Länge? Aufl.: e—f, gis_1, gis_2. — A. 422. Wie lang darf eine gedeckte Pfeife nur sein, um c_4 zu geben? Aufl.: 4^{cm}. — A. 423. Wie lang für denselben Zweck eine offene Pfeife? Aufl.: 8^{cm}. — A. 424. Welchen Ton gibt eine offene Pfeife von 1^m Länge? Aufl.: Nach (39) ist $n = 166$, also etwa e. — A. 425. Welche Länge ist nöthig für den Ton c_2: Aufl.: 32^{cm}. — A. 426. Welches sind der erste, zweite und dritte Differenzton, sowie der Summationston von c_1 und a_1? Aufl.: f, f_{-1}, f_1, f_2. — A. 427. Die 3 ersten Differenztöne von h_2 und c_2, sowie den Summationston zu finden? Aufl.: b_1, c_{-1}, b_2, fis_3.

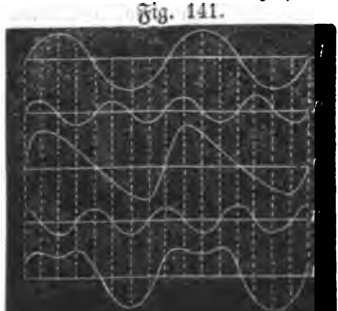
4. Der Klang (Helmholtz 1863).

a. Die Klangfarbe.

261 **Begriff der Klangfarbe.** Unter Klangfarbe versteht man die Eigenthümlichkeit, durch welche die Klänge verschiedener Instrumente und verschiedener Stimmen, wenn sie auch gleiche Höhe und gleiche Stärke besitzen, sich von einander unterscheiden. Da die Tonhöhe durch die Schwingungszahl und die Stärke durch die Schwingungsweite bedingt ist, so war man schon seit langer Zeit der Meinung, daß die Klangfarbe von der Schwingungsform oder Wellenform abhänge, welche Form man entweder durch Auftragen der Elongationen zu beiden Seiten einer die Schwingungszeit darstellenden Achse (nach 224.) oder nach Lissajous' Methode (235.) erkennen kann. Einfache pendelartige Schwingungen geben immer dieselbe einfache, regelmäßige Wellenform (Fig. 125, S. 226); diese Form wird nur verändert, wenn die Schwingungsbewegung eine zusammengesetzte ist. Wenn also die Klangfarbe von der Verschiedenheit der Schwingungsform herrührt, so muß sie ihren tieferen Grund in der verschiedenartigen Zusammensetzung der Wellen des Klanges haben. Zusammengesetzte Wellen werden aber nach Ohms Klanggesetz durch das Ohr in eine Anzahl pendelartiger Schwingungen zerlegt, denen eben so viele einfache Töne entsprechen, der Grundton mit seinen Nebentönen, meistens der Grundton mit seinen harmonischen Obertönen. Hieraus würde sich ergeben, daß die Klangfarbe von der Art der Mischung des Grundtones mit den Neben- oder Obertönen abhänge. Diese hypothetische Folgerung erhält dadurch eine Stütze, daß nach 258. wirklich die meisten Klänge nicht einfache Töne, sondern aus dem Grundtone und den Nebentönen zusammengesetzt sind. Die näheren Untersuchungen von Helmholtz (1863) haben es über allen Zweifel erhoben: *Die Klangfarbe hängt nur ab von der Anzahl, Höhe und Stärke der Nebentöne, die einem Grundtone beigemischt sind, und welche bei den musikalischen Klängen harmonische Obertöne sein müssen.*

Hierbei wird indeß abgesehen von den Geräuschen, welche häufig mit der Tonbildung verknüpft sind, von den Zischgeräuschen der Blasinstrumente, den Kratzgeräuschen der Saiteninstrumente, von den Eigenthümlichkeiten des Tonansprechens und des Verklingens, welche ebenfalls bei jedem Klange etwas Characteristisches haben, das von dem gewöhnlichen Ohre zur Erkennung des Klanges unbewußt benutzt wird; der Satz von Helmholtz bezieht sich nur auf den Klang des reinen fertigen Tones nach Abzug seiner unwesentlichen Nebenelemente. Dieser Satz ist kein Gesetz, sondern eine Begriffsbestimmung; er ist daher nicht mathematisch zu beweisen, sondern durch Versuche nachzuweisen. Mittels der Resonatoren und anderer Klangzerlegungsmethoden ist darzuthun, daß und warum die Klänge der verschiedenen Tonerreger eine verschiedene Zahl verschieden hoher und starker Nebentöne enthalten, und welche Klangfarbe durch die verschiedenen Combinationen der Grundtöne mit den Nebentönen entsteht; eine noch festere Begründung erhält der Satz von Helmholtz, wenn das umgekehrte Verfahren gelingt, wenn man nämlich durch künstliche Erzeugung dieser Mischungen die betreffende Klangfarbe nachahmen kann.

Fig. 141.



Wie durch Zusammensetzung von Schwingungsbewegungen die Wellenform sich ändert, ist aus Fig. 141 zu ersehen. A und B stellen die Wellen eines einfachen Grundtones und seiner Octave vor. In C sind an gleichen Stellen der gleichen wagrechten Achse die senkrechten Ordinaten dieser Curven, welche die Elongationen der schwingenden Theilchen vorstellen, addirt oder subtrahirt aufgetragen, je nachdem sie auf einer Seite oder zu beiden Seiten der wagrechten Achse liegen; hierdurch entsteht denn die ganz neue Wellenform C. Verbindet man in derselben Weise die Welle B in der Lage

D, wo die Phasen um 1/4 der Wellenlänge verschoben sind, mit A, so entsteht die von C ganz verschiedene Welle E. Obwohl also die Bestandtheile von C und E dieselben sind, so bilden dieselben doch ganz verschiedene Verbindungen, weil sie in verschiedenen Phasen combinirt sind. Hieraus könnte man schließen, daß der Phasenunterschied zweier Töne einen Einfluß auf den Klang haben könnte; dies ist aber nicht möglich, weil das Ohr die beiden Formen C und E nach den Gesetzen des Mitschwingens in ganz gleicher Weise in die beiden Elemente A und B zerlegt, also in beiden Fällen Grundton und Octave empfindet. Die Klangfarbe der Klänge ist also unabhängig von dem Phasenunterschiede der mit dem Grundtone verbundenen Nebentöne, ein Satz, der ebenfalls von Helmholtz durch Versuche nachgewiesen wurde. Hiermit ergibt sich denn auch, daß die ursprüngliche Meinung, der Klang hänge von der Schwingungsform ab, sich nicht vollkommen bewährt, da verschiedene Wellenformen demselben Klange zugehören können. Die Unabhängigkeit des Klanges von dem Phasenunterschiede der Töne gilt indeß nur für musikalische Klänge, nicht aber für Geräusche.

262 1. Klänge ohne Obertöne. Kein Tonerreger gibt für sich einen einfachen Ton; Klänge ohne Obertöne müssen also künstlich erzeugt werden. Dies kann z. B. geschehen, indem man eine angeschlagene Stimmgabel über eine auf denselben Ton abgestimmte Resonanzflasche hält; die Obertöne einer Stimmgabel sind nach 247. unharmonisch zu dem Grundtone, stimmen daher nicht mit den Obertönen der Flasche, die ohnedies nach 251. schwer ansprechen, können dieselben daher auch nicht zum Mittönen bringen; nur der Grundton der Flasche wird demnach durch die Gabel angeregt; er klingt sehr weich und in der Tiefe dumpf und leer; mischt man aber die ersten (etwa 5) harmonischen Obertöne mit geringer Stärke nach 258. zu dem Grundtone der Flasche, so wird derselbe reich, voll, wohllautend, harmonisch, wie es die Töne der offenen Orgelpfeifen, der Flöten, des Klaviers, der mittelstarken menschlichen Stimme sind. Werden aber die höheren Obertöne noch zugemischt, besonders diejenigen, welche 7, 11, 13 . . . mal soviel Schwingungen als der Grundton vollziehen, welche also gegen einander unharmonisch sind, mit einander dissoniren, so wird das Ohr von den verschiedensten, theilweise gegen einander unharmonischen Empfindungen erregt, der Ton wird scharf und rauh. Man kann dies besonders gut mit Appunns Obertöne-Apparat zeigen, wenn man sämmtliche 64 Partialtöne auf einmal anbläst; bei den Mixturregistern der Orgel öffnet jede Taste nicht eine einzige Pfeife, sondern eine ganze Reihe, welche die harmonischen Obertöne des betreffenden Tastentones geben, dadurch wird der Klang durchdringend, mächtig, aber scharf und rauh. Klänge ohne Obertöne sind weich und dumpf, Klänge mit den 5 ersten Obertönen sind reich und harmonisch, Klänge mit vielen, besonders mit hohen Obertönen sind rauh und scharf.

2. Klänge mit unharmonischen Obertönen. Die Transversalklänge der Stimmgabeln und anderer Stäbe sind (nach 247.) mit sehr hohen und unharmonischen Nebentönen, oft auch mit gleichzeitig erregten Longitudinaltönen verbunden. Bei der Stimmgabel hört man wegen des starken Klanges dieser Obertöne beim Anschlagen den Grundton kaum; da dieselben aber rasch verklingen, so wird der Grundton sehr bald fast allein hörbar. Auch in Stäben von Glas und Holz verklingen die Obertöne sehr rasch, aber mit ihnen der Grundton, weil die Elasticität und Masse solcher Stäbe geringer ist; daher haben solche Stäbe einen kurzen Ton im Vergleiche mit Metallstäben, deren größere Masse auch wegen größerer Elasticität länger in ihrer Bewegung verharrt; der metallische Klang beruht in dem ausdauernden Vorwalten hoher Obertöne. Weil dieselben bei Stäben sehr hoch sind, so fällt das Unharmonische derselben bei karger Verwendung weniger ins Ohr und gibt in manchen Fällen den Musikstücken etwas Helles und Heiteres, worauf die Anwendung der Triangel und des Schellenbaumes beruht; aber eine ausschließliche, länger dauernde Stabmusik wird doch bald unerträglich. Noch mehr gilt dies für Scheiben, Glocken und Membrane, weil deren unharmonische Nebentöne dem Grundtone sehr nahe liegen. Nur bei Glocken kann man die Töne harmonisch zu einander machen, wenn dieselben nach dem Rande zu dünner werden; das Glockengeläute, das Glockenspiel und die Glasharmonica sind daher eher erträglich, obwohl längere Stücke derselben die Nerven sehr erschüttern.

3. Die Klänge der Saiten. a. Gezupfte oder geschlagene Saiten. Da hier die Obertöne durch Mitschwingen aliquoter Saitentheile entstehen, so sind dieselben harmonisch zu dem Grundtone; die Zahl und Stärke der Obertöne ist verschieden nach der Art des Anschlages, nach der Stelle des Anschlages und nach der materiellen Beschaffenheit der Saiten. — Je schärfer das Eck ist, welches die Saite durch den Anschlag oder das Zupfen bildet, desto kürzer und breiter sind die hierdurch erzeugten Wellen, desto höher und stärker sind demnach die entstehenden Obertöne, desto klimpernder wird der Klang; die Obertöne überwiegen sogar den Grundton an Stärke, wenn man die Saiten mit einem

metallenen Stifte reißt oder schlägt; man hört in diesem Falle den Grundton kaum, es entsteht ein leerer klimpernder Klang. Leer ist also ein Klang, wenn die Obertöne zu stark gegen den Grundton sind. Am vollsten wird der Ton, wenn man mit dem weichen Finger zupft, etwas weniger voll beim Anschlagen mit einem weichen Hammer, wie es im Klavier geschieht; hier sind besonders die tiefen Obertöne sehr stark, oft stärker als der Grundton, wodurch der Ton zwar an Macht einbüßt, aber an harmonischer Fülle gewinnt. — Die Anschlagstelle hat den Einfluß, daß (nach Young) sämmtliche Töne fehlen, deren Knoten in die Anschlagstelle fallen. Schlägt man in der Mitte an, so fehlen alle geradzahligen Obertöne, also auch sämmtliche Octaven des Grundtones; der Ton wird näselnd und hohl. Hohl ist ein Klang, dem die näheren und dem Grundtone nächstverwandten Obertöne fehlen. Liegt die Anschlagstelle einem Saitenende nahe, so entstehen kleine Wellen, hohe Obertöne, der Klang wird klimpernd. In den Klavieren legt man die Anschlagstelle etwa in $1/7$ der Saitenlänge; hierdurch werden der siebente und neunte Oberton, welche gegen einander unharmonisch sind, und welche deßwegen den meisten Saitenklängen einen unharmonischen, scharfen Charakter geben, gedämpft, dagegen überwiegen die tieferen Obertöne, Octaven, Quinte, Terz, wodurch der Ton voll und harmonisch wird. Nur bei den höheren Klaviersaiten, bei welchen wegen der Steifigkeit kurzer Saiten die Obertöne schwer ansprechen, legt man die Anschlagstelle näher an das Saitenende; auch in dicken Saiten sprechen die Obertöne schwerer, um so leichter aber an sehr dünnen Metallsaiten an; an einer solchen erhielt Helmholtz noch den 18. Oberton. Auf Darmsaiten verklingen die hohen Obertöne rascher; die Guitarre und die Harfe sind daher weniger klimpernd als die Zither. b. Gestrichene Saiten geben einen stärkeren Grundton, weil die Erregung nicht so beschränkt ist; die ersten Obertöne sind schwach, 4, 9, 16 mal schwächer als der Grundton; die höheren Obertöne vom sechsten bis zum zehnten sind viel deutlicher und verursachen die Schärfe des Klanges gestrichener Saiten. (Untersuchungen von Helmholtz mit dem Vibrations-Mikroskop.)

263 **Klänge der Pfeifen.** a. Offene Lippenpfeifen. Sind die Pfeifen sehr weit, wie es bei den Principalstimmen der Orgel der Fall ist, so sprechen die Obertöne schwer an; daher ist nur der erste Oberton stark, der zweite schon sehr schwach; der Klang ist stark, weich und voll. Aus demselben Grunde ergeben bei schwachem Anblasen die höheren Flötenregister der Orgel und die gewöhnlichen Flöten weiche, schwache Töne. Die engen, cylindrischen Geigenregister der Orgel lassen dagegen die höheren Obertöne, bis zum sechsten einschließlich, leicht erklingen; außerdem entsteht hier bei stärkerem Anblasen das Blasegeräusch, dessen Theiltöne häufig zur Verstärkung der höheren Obertöne beitragen; hierdurch erhalten die Klänge dieser Register etwas geigenartig Scharfes. Die spitzen Orgelpfeifen, wie Gemshorn und Spitzflöte, haben einen hellen leeren Klang, weil der vierte bis sechste Oberton die tieferen an Stärke übertreffen und einem schwachen Grundtone beigemischt sind. — b. Gedeckte Lippenpfeifen. Nach 250. sind bei den gedeckten Pfeifen nur die ungeradzahligen Obertöne möglich, die Octaven fehlen; weite gedeckte Pfeifen geben daher wie Flaschen fast einfache Töne; bei engeren klingt namentlich der zweite Oberton, die Quinte der Octave am stärksten mit, weßhalb solche Orgelpfeifen Quintaten heißen. Gedeckte Pfeifen klingen im Allgemeinen wegen geringer Obertönezahl weicher und in der Tiefe dumpfer als die offenen. Ebenso klingen Holzpfeifen weicher und weniger hell als Metallpfeifen, weil die höheren Obertöne durch stärkere Reibung aufgehoben werden. — c. Zungenpfeifen. Bei freien Zungen ohne Schallbecher wird der Ton ausschließlich durch die Zunge vermittelt, deren Oeffnen und Schließen des Windspaltes Luftstöße verursacht. In diesen Stößen haben die Lufttheilchen die verschiedensten Bewegungen; deßhalb entstehen sehr viele Obertöne, bis zum zwanzigsten und darüber; die Zungenklänge sind scharf und schnarrend, am meisten bei aufschlagenden Zungen, am wenigsten bei den freien, weichen Stimmbändern des Menschen. Ein Schallbecher übt (nach 252.) in den meisten Fällen einen großen Einfluß schon auf den Grundton aus; noch größer ist derselbe für die Obertöne, welche verstärkt werden, wenn sie den eigenen Obertönen der Zunge entsprechen, im anderen Falle aber gedämpft werden bis zum Verschwinden. Eine weite Resonanzkugel, die mit dem Grundtone einer Zunge stimmt, verlöscht alle Obertöne derselben. Außerdem gibt eine Zungenpfeife, da sie an der Zunge als gedeckt anzusehen ist, nur die ungeradzahligen Obertöne; an Appunns Zungenpfeife treten besonders der 9te, 11te und 13te Oberton stark hervor. Aus diesem Grunde hat die Clarinette einen etwas hohlen, näselnden Klang. Bei den anderen Blasinstrumenten, die sich durch ihre kegelförmige Erweiterung mehr den offenen Pfeifen nähern (252.), treten auch die geradzahligen Obertöne auf, weßhalb ihr Klang voller ist.

264 **Klänge der Vocale.** Die Zahl der Obertöne ist bei der menschlichen Stimme, da dieselbe eine Zunge ist, groß; in kräftigen Baßstimmen kann man bei hellen Vocalen noch den 16ten Oberton erkennen; die hohen Obertöne sind in hellen, scharfen Stimmen stärker

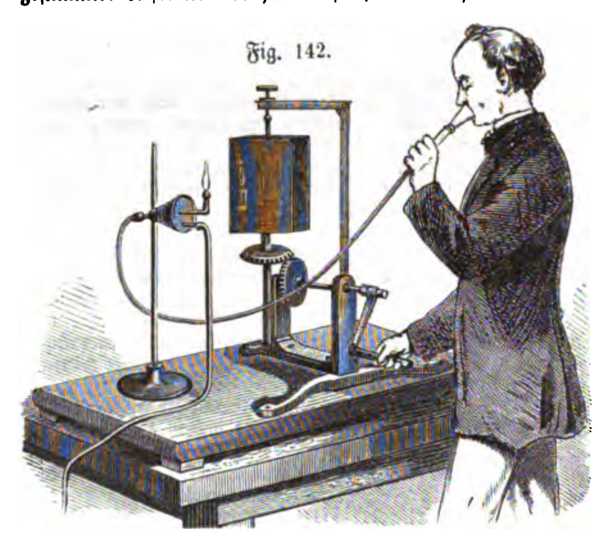
als in weichen und dumpfen. Der Klang beim Sprechen ist heller und schärfer als beim Singen, wahrscheinlich weil (nach Helmholtz) die Stimmbänder beim Sprechen etwas über einander schlagen, also wie aufschlagende Zungen wirken. Bei der Bildung der Vocale wirkt die Mundhöhle als Schallbecher mit, sie dämpft einzelne Obertöne, läßt anderen ihre Stärke und verleiht einem oder zwei Obertönen von ganz bestimmter absoluter Höhe im Notensystem (nicht im Verhältnisse zum Grundtone) dadurch eine ganz besondere Stärke, daß sie durch eigene Formung auf jene Töne abgestimmt wird. Die Zumischung dieser Bestimmungstöne von ganz bestimmter Höhe zu jedem beliebigen, noch mit anderen schwächeren Obertönen vermischten Grundtone gibt demselben den eigenthümlichen Klang, der auf unser Ohr den Vocaleindruck macht. Jene Bestimmungstöne der Vocale ändern sich nach der Klangfarbe eines und desselben Vocales in verschiedenen Dialecten und Sprachen, nicht aber nach Alter und Geschlecht. Der Vocal U enthält den Bestimmungston f, der Vocal O ist charakterisirt durch den Ton b_1, der Vocal A durch den Ton b_2, der bei dem scharfen A der Engländer und Italiener bis d_3 steigt. Die übrigen Vocale enthalten zwei Bestimmungstöne: im Ae finden sich g_3 und d_2, im E sind b_3 und f_1 enthalten; der hohe Ton d_4 und der tiefe Ton f bilden den Klang des J, während das Ue zwar auch den Ton f, aber das weniger hohe g_3 enthält, und das Oe, ähnlicher dem E, die Töne f_1 und cis_3 in sich trägt. Um diese Töne dem Grundtone zumischen zu können, erhält beim U die Mundhöhle die Gestalt einer Flasche ohne Hals mit einer engen Oeffnung, dem Munde, die sich für das O bei gleichzeitiger Zusammenziehung der Höhlung selbst etwas erweitert und für das A in vollständige Trichterform übergeht. Für das Ae wird der Hohlraum der Flasche im Hintermunde wieder etwas weiter, er liegt ganz im Schlunde, während im Vordermunde zwischen Zunge und Gaumen diesem Hohlraume ein enger Hals angesetzt wird; dadurch entstehen zwei Töne, der Halston ist der höhere, der Flaschenton der tiefere; beim Ae ist der Hals noch weit, der Hohlraum eng, bei E und J wird der Hals immer noch etwas enger und der Hohlraum immer weiter. Für das Oe und Ue verlängert sich der Hals bis an die Lippen, der hohe Oberton wird tiefer. Werden menschliche, besonders Baßstimmen zu stark angestrengt, so liegen die Obertöne d_4 bis g_4 in denselben; da nun der Gehörgang gerade auf diese Töne abgestimmt ist, so wird das Ohr durch jene gegen einander dissonirenden Töne empfindlich erregt, und hört in starken, schreienden Männerchören ein unangenehmes Gerassel.

Der Vocalapparat von Helmholtz macht experimentelle Nachweise für die vorausgegangenen Sätze und Erscheinungen möglich. Derselbe besteht aus vielen Stimmgabeln, die auf einen Grundton, dessen Obertöne und die bestimmten Vocalobertöne abgestimmt sind. Die Stimmgabeln werden in andauernde Schwingungen versetzt durch die beiden Pole eines Elektromagnetes, dessen elektrischer Strom durch einen anderen Stimmgabelapparat nach Bedürfniß unterbrochen wird, und werden durch eine gegenüberstehende Resonanzröhre verstärkt. Königs Apparat zu demselben Zwecke besteht aus sehr guten Stimmgabeln, die auf Resonanzkästen befestigt sind und daher lange tönen. Auch Appunns Obertöneapparat kann zu Versuchen über die Klangfarbe benutzt werden. Um einen bestimmten Klang zu erzeugen oder einen der angeführten Sätze nachzuweisen, läßt man den Grundton und die betreffenden Obertöne gleichzeitig erklingen. Appunn hat übrigens auch einen aus Zungen und Pfeifen zusammengesetzten Vocalapparat construirt.

Diese Vocalapparate setzen die Klänge aus Partialtönen zusammen, dienen also zur Synthese der Klänge. Die Analyse der Klänge hat dagegen zum Ziel, die Klänge in ihre Partialtöne zu zerlegen. Die akustische Analyse kann nicht so weit gehen wollen, alle Partialtöne eines Klanges gleichzeitig isolirt hörbar zu machen; sie hebt vielmehr einen nach dem anderen aus dem Tongemisch stark hervor und weist so seine Existenz nach; es geschieht dies mittels der Resonatoren. Sichtbar gemacht werden die Partialtöne durch die anderen in 258. angeführten Klangzerlegungsmethoden, die Flasche mit dem Membranboden, die Saitenreiter u. s. w.; solche Methoden sind optische Analysen. Es gibt jedoch auch eine optische Analyse, welche es möglich macht, alle Partialtöne eines Klanges gleichzeitig zu sehen, die Flammenanalyse von König (1865), deren Grundgedanke schon in 250. angegeben wurde. Zum Verständnisse derselben kann Fig. 142 dienen. Wenn die Gasflamme und der Spiegel in Ruhe sind, so sieht man in dem Spiegel ein einfaches Bild der Flamme; ist aber der Spiegel in rascher Drehung, so erscheint das Bild jeden Augenblick an einer anderen Stelle, es scheint rasch über den Spiegel hinzulaufen, und bildet einen feurigen Streifen von der Breite der Flammenhöhe und von der Länge der Spiegelbreite, ähnlich wie eine im Kreise geschwungene glühende Kohle einen feurigen Kreis erzeugt. Wenn nun die Flamme auch noch aufzuckt, so wird ihr Bild während einer Aufzuckung fortwährend länger und dann kürzer, der feurige Streifen enthält einen breiten feurigen Zacken, dessen Breite um so kleiner ist, je kürzer die Zuckzeit war; und zuckt die Flamme in regelmäßigem Tempo auf, so entstehen in einer Secunde so viele feurige

Zacken, als die Flamme Zuckungen macht; der obere Theil der Flamme gewährt dann den Anblick von Fig. 143. Statt des Mundstücks in Fig. 142 kann nun auch ein auf c abgestimmter Resonator vorhanden sein, vor welchem eine Stimmgabel den reinen einfachen Ton c erzeugt; dieser Ton pflanzt sich dann durch die Röhre fort und versetzt in derselben Weise, wie durch den Resonator unser Trommelfell angeregt wird, die zarte Membran, welche die Flammenkapsel nach der Röhre zu abschließt, in Schwingungen; jede Einwärtsbewegung der Membran übt auf das Gas in der Kapsel einen Druck aus, stößt es heftiger aus dem Brenner und erzeugt eine Zuckung der Flamme; es entstehen folglich so viele Zuckungen, als der Ton Schwingungen enthält; die Flammenbilder der Töne geben uns also auch die Schwingungszahlen der Töne und die Verhältnisse der Intervalle zu erkennen; so entstehen durch den Ton g_1, der 3mal so viel Schwingungen als c enthält, für jeden Zacken des letzteren Tones deren 3, wie die Fig. 143 angibt. Königs manometrischer Flammenapparat enthält zahlreiche Resonatoren über einander, die mit einer Reihe von Flammenkapseln

Fig. 142.



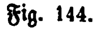


Fig. 143.

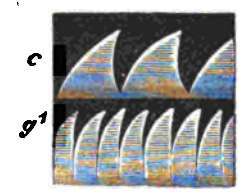


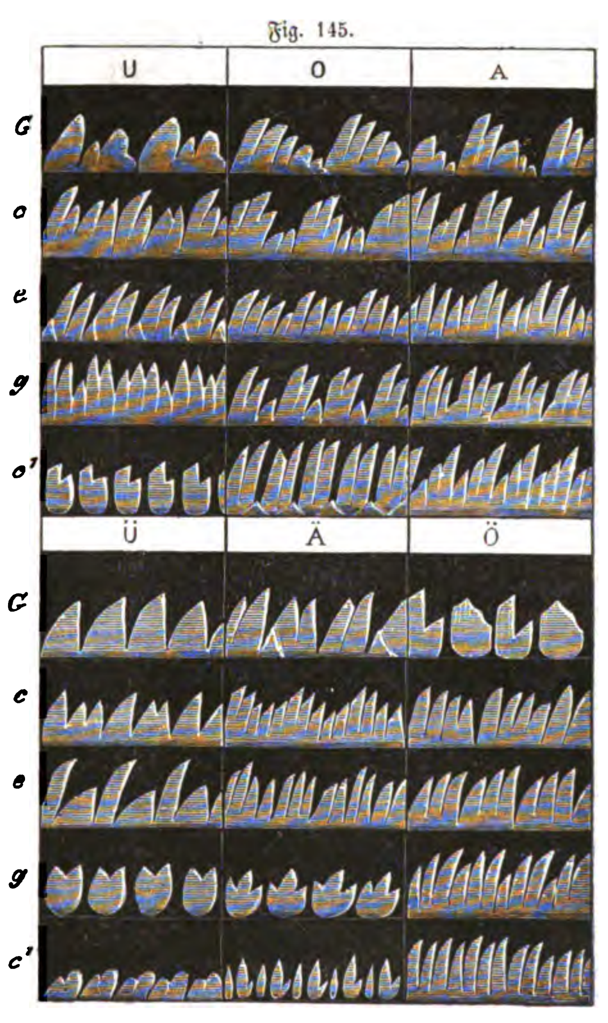
Fig. 144.



verbunden sind, vor welcher ein langer Spiegel rotirt; wird nun irgend ein Klang angegeben, so zucken alle diejenigen Flammen, deren Resonatorton in dem Klange enthalten ist; die Bilder dieser Flammen werden zackig, während die übrigen in Streifenform verbleiben; man kann also mittels eines solchen Apparates die Partialtöne eines Klanges sammt ihren Schwingungszahlen sehen. Indessen ist dies auch mittels des einfachen Apparates Fig. 142 nach einiger Einübung möglich. Werden mittels der Röhre die 2 Töne c und g_1 in die Flammenkapsel geleitet, so theilt sich jede breite Zuckung des c noch in 3 feinere des g_1; die entstehenden Flammenbilder erscheinen dann in den 6 verschiedenen Formen der Fig. 144, welche leicht erkennen lassen, daß sie von einem Grundtone in Verbindung mit seinem zweiten Obertone herrühren. Erzeugen nun alle Klänge eines Instrumentes solche ähnlichen Flammenbilder, so lassen diese deutlich ersehen, daß in jenen Klängen immer der Grundton mit seinem zweiten Obertone gemischt ist, zerlegen also den Klang sichtbar in seine Partialtöne. Da für jedes Instrument der Klang aller Töne durch dieselbe Tonmischung entsteht, so hat auch jedes Instrument seine bestimmte Flammenfigur, die zwar vergrößert oder verkleinert bei tieferen oder höheren Tönen, aber immer in geometrischer Aehnlichkeit auftritt und dem Kundigen sofort die Tonmischung sichtbar macht. Die Theile von Fig. 145 geben die durch jenen Apparat erzeugten Flammenbilder der in die Röhre gesungenen über den einzelnen Reihen angegebenen Vocale (v. Zahn, Leipzig 1871), und zwar wurden die Vocale auf den links angegebenen Tönen einer Baßstimme gesungen. Es ist leicht zu ersehen, daß den Flammenbildern eines und desselben Tones

für die verschiedenen Vocale die geometrische Aehnlichkeit fehlt, woraus der Helmholtz'sche Satz ersichtlich ist, daß ein Vocal nicht durch Mischung eines Grundtones mit einer und derselben Zahl seiner Obertöne entsteht. Dagegen ist leicht zu ersehen, daß z. B. für den Vocal A die 3 Hauptzacken des Grundtones c sich in je 5 Zacken zerlegen, daß also dieser Grundton c auf A gesungen seinen 4ten Oberton e_2 enthält; bei dem Grundtone e theilt sich jeder Hauptzacken in 4 Zähne, zeigt also das Vorhandensein desselben Tones e_2, des dritten Obertones von e an; auch im Tone g enthält der Vocal A diesen bestimmten Oberton e_2, denn jeder Zacken des g ist in 3 Theile getheilt, und e_2 enthält nahezu 3mal so viel Schwingungen als g; ebenso zeigte jeder andere gesungene Vocal A durch sein Flammenbild an, daß dem Grundtone immer der Bestimmungs-Ton e_2 zugemischt war. Wenn nun auch Helmholtz b_2 als den Bestimmungs-Ton des Vocals A angibt, so beweisen doch diese Versuche die Wahrheit des Satzes, daß der Vocalcharacter durch einen Bestimmungston erzeugt wird; bei dem betreffenden Sänger war offenbar wegen seiner dunkeln sächsischen Aussprache des Vocals A der Bestimmungston tiefer als in dem norddeutschen hellen A.

Fig. 145.



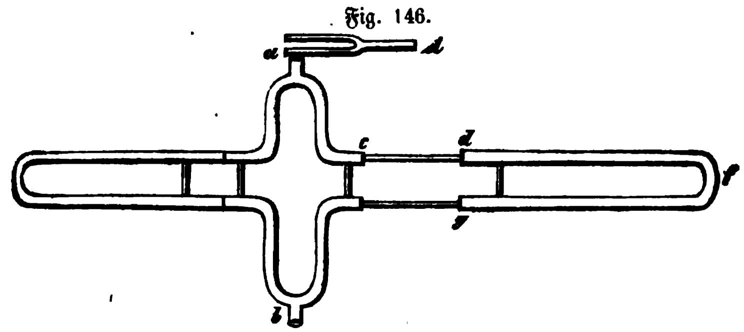
b. Der Zusammenklang.

Interferenz des Schalles. Wenn sich zwei Töne nach gleicher Richtung fortpflanzen, und wenn ihre Verdichtungswellen auf einander fallen, wie auch ihre Verdünnungswellen, was der Fall ist, wenn die Töne von gleicher Höhe sind, und wenn ihre Erregungsstellen um eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander abstehen, so verstärken (nach 226.) die Wellen einander, der Ton wird stärker. Fällt aber immer eine Verdichtung des einen Tones mit einer Verdünnung des anderen zusammen, was stattfindet, wenn die Erregungsstellen gleich hoher Töne um eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen von einander entfernt sind, so schwächen sich die beiden Töne, ja sie heben bei gleicher Stärke einan- 265

der auf. Doch ist hierbei vorausgesetzt, daß die Töne einfach seien; sind Obertöne mit denselben verbunden, so wird in dem letzten Falle der Klang nicht ganz verlöscht, der Grundton verschwindet, Obertöne bleiben; ist z. B. der Abstand der Erregungsstellen = $1/2$ Wellenlänge des Grundtones, so ist er = 1 Wellenlänge der Octave, des ersten Obertones; wird also der Grundton aufgehoben, so wird der erste Oberton verstärkt; deßhalb springt bei manchen Interferenzen an der Stelle des verschwindenden Grundtones die Octave stark hervor.

Nachweise. In dem Röhrenapparate Fig. 146 ist der Theil dfg ausziehbar. Wird derselbe soweit ausgezogen, daß cd entweder = o, oder = $1/2$, $2/2$, $3/2$ ... der Wellenlänge des Tones der Stimmgabel st ist, so hört man bei b den Ton deutlich, wenn auch die Röhren a und b viel länger sind. Beträgt aber cd = $1/4$, $3/4$, $5/4$ ..... Wellenlänge, so

Fig. 146.



ist der Stimmgabelton bei b vollständig verschwunden. — Hält man eine Gabelröhre, deren gemeinschaftliche obere Röhre durch eine mit Sand bestreute Membran geschlossen ist, mit ihren zwei unteren Oeffnungen zu beiden Seiten einer Knotenlinie über benachbarte Theile einer tönenden Scheibe, so hüpft der Sand nicht; liegen aber zwischen den Oeffnungen zwei Knotenlinien, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung. — Bläst man eine Helmholtz'sche Doppelsirene an, wenn die Löcher des oberen und des unteren Rades correspondiren, so wird der Ton verstärkt; wenn aber die Löcher des eines Rades mit den Zwischenräumen des anderen correspondiren, so verschwindet der Grundton und die Octave erscheint. — Zwei gleiche, neben einander stehende gedeckte Pfeifen wirken so auf einander, daß die Luft in die eine strömt, wenn sie aus der anderen tritt; die Töne sind daher in entgegengesetzten Phasen, sie verstärken sich nicht, sie bilden nur ein Sausen; bei offenen Pfeifen entsteht die Octave. — Die zwei Zinken einer Stimmgabel bilden Interferenzen; der Ton ist auf einer Hyperbel, die durch die 4 äußeren Zinkenkanten geht, sehr geschwächt; man kann dies schon durch Drehung einer tönenden Gabel vor dem Ohre merken; deutlicher tritt es hervor, wenn man eine tönende Gabel über einer passenden Resonanzröhre dreht. Schiebt man in dem Moment des Verschwindens über die eine Zinke eine Röhre, so erscheint der Ton wieder, weil jetzt die Interferenz unmöglich ist; ebenso wird der Ton einer Scheibe verstärkt, wenn man alternirende Sectoren durch die darüber gehaltene Hand dämpft, weil hierdurch Interferenzen beseitigt werden. Wenn (Gripon 1874) ein an einer senkrecht aufgestellten Membran hängendes Pendelchen in größerer Entfernung durch eine unisono tönende Stimmgabel heftig abgestoßen wird, so bleibt dasselbe in größter Nähe fast ganz in Ruhe und der Ton der Stimmgabel klingt sehr schwach. — Stefan (1868) hat den Apparat (Fig. 146) zur sichtbaren Darstellung der Interferenz von Longitudinaltönen benutzt; er befestigte an beiden Oeffnungen Glasröhren, die leichten Korkstaub oder dergl. enthalten und beide durch Korkstöpsel geschlossen sind. In die eine Röhre bringt durch den Stöpsel ein Glasstab wie eine Kolbenstange durch eine Stopfbüchse, und endigt in einem Korkkolben, der mit dem Stabe verschoben werden kann. Reibt man nun den Stab, so entstehen die bekannten Wellenfiguren in der Röhre des Korkes; in der zweiten Röhre bilden sie sich ebenfalls, wenn cd = $1/2$, $2/2$, $3/2$ .... von der Wellenlänge des Tones ist; dagegen bleiben die Stäubchen in der zweiten Röhre ganz ruhig, wenn cd = $1/4$, $3/4$, $5/4$ .... von der Wellenlänge ist.

266 **Die Schwebungen** (Scheibler 1814). Sind zwei gleichzeitig erklingende Töne nicht von gleicher Höhe, oder doch von geringem Höhenunterschiede, so entstehen abwechselnde Anschwellungen und Verminderungen der Tonstärke, welche man Schwe-

bungen nennt; die Anschwellungen nennt man Stöße oder Schläge, die Verminderungen Pausen, da sie häufig bis zum Verlöschen gehen. **Die Zahl der Schwebungen ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne.**

Beweis. Wenn die zwei Töne gleichzeitig beginnen, so fällt anfänglich der Wellenberg des einen mit dem Wellenberge des anderen Tones zusammen, und auch die nachfolgenden Thäler fallen noch in einander; da aber die Welle des einen Tones länger ist als die des anderen, so wird schon nach der Bildung einer zweiten Welle der zweite Berg der kürzeren Welle dem zweiten Berge der längeren Welle um etwas voraus sein; dieses Vorauseilen wird bei den folgenden Wellen immer beträchtlicher werden, endlich wird der Berg der kürzeren Welle auf das Thal der längeren treffen, der Ton wird bei gleicher Stärke der beiden Töne verschwinden. In der folgenden gleichen Zeit muß bei fortdauernder Wellenentwickelung der Berg der kürzeren Welle dem Thale der längeren immer mehr voraneilen, die Verminderung der Bewegung muß immer kleiner werden, bis die Berge der beiden Wellen zusammenfallen und dadurch Verstärkung der Bewegung oder des Tones stattfindet. So wechseln also an derselben Stelle Verminderung und Anschwellung des Tones; dieses findet so oft statt, als Schwingungen in gleicher Richtung auf einander treffen. Geschieht dieses z. B. im Anfange einer Secunde, so werden in den folgenden Zeittheilchen die an einer gewissen Stelle anlangenden Schwingungen immer weniger auf einander treffen; erst nach einem solchen Bruchtheile der Secunde gehen sie wieder nach gleicher Richtung, in welchem der eine Ton eine Schwingung mehr vollzogen hat als der andere; in den mittleren Zeitpunkten zwischen solchen Coincidenzen sind die Schwingungen einander entgegengesetzt, heben sich also auf. Hiermit ist das Gesetz bewiesen.

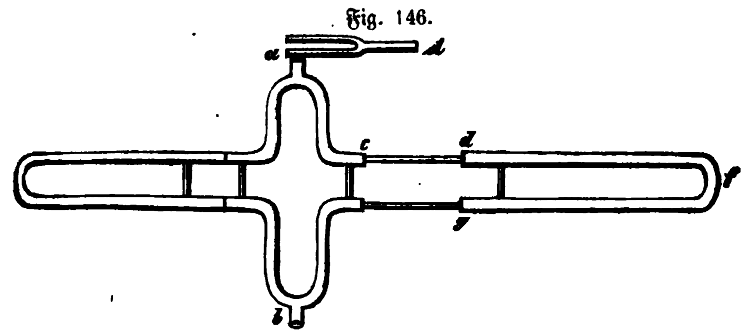
Nachweise. Appunns Tonmesser hat 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schwingungen mehr gibt als die vorhergehende; man hört daher beim Anblasen von je zwei neben einander liegenden Zungen 4 Stöße, dagegen 8, 12, 16 . . . . ., wenn zwischen zwei tönenden Zungen 1, 2, 3 . . . . ruhende liegen. In den Pausen ist indeß hier keine Ruhe. Schweigende Pausen erhält man mit 2 ganz gleichen Stimmgabeln, von denen man die eine mit Wachs beklebt, oder mit gleichen gedeckten Pfeifen, von denen man die eine verstimmt, indem man nur die Hände vor das Mundloch hält oder die Lappen biegt oder den Deckel verschiebt. Claviertöne schweben, wenn eine Saite eines Tones gegen die andere verstimmt wird. Scheiblers Gesetz ist am leichtesten nachzuweisen mit der Doppelsirene von Helmholtz, an welcher man den Windkasten des einen Rades ebenfalls drehen kann; bei jeder Drehung entstehen so viele Schwebungen, als die Luftstöße der einen Sirene auf die Löcherzwischenräume des anderen Rades treffen. — Für das Auge wahrnehmbar lassen sich die Schwebungen auf mehrere Arten machen. Auf dem Phonautograph erhält man von zwei schwebenden Tönen eine Wellenlinie mit abwechselnd sehr hohen und kaum merklichen Bergen. — Befestigt man bei Lissajous' Lichtversuch (235.) den zweiten Spiegel ebenfalls an einer Stimmgabel, die ein wenig gegen die erste Gabel verstimmt ist, aber parallel zu derselben steht, so erhält man auf der Tafel eine abwechselnd steigende und fallende Lichtwelle. — Am schönsten aber sind die Schwebungen gleichzeitig zu hören und zu sehen mit Königs Interferenzflammenzeiger. Zwei gleiche Pfeifen stehen neben einander und sind mit Membrangehäuschen versehen, die mit einem und demselben Brenner und mit einem Gasreservoir verbunden sind. Die Flamme tanzt im Tacte nach den Schlägen hin und her, die man leicht durch Verstimmen der einen Pfeife erzeugen kann. In dem Spiegel erscheint bei dessen Drehung das Flammenbild bald in einzelne kleine Flammen getrennt, bald als zusammenhängender Berg.

Die Stöße wurden schon von Scheibler zum Stimmen vorgeschlagen. Hat man für jeden zu bestimmenden Ton zwei Gabeln, von denen die eine 4 Schwingungen per Secunde mehr, die andere 4 weniger als der zu stimmende Ton erzeugt, so ist dieser Ton auf seiner richtigen Höhe, wenn er mit jeder der beiden Gabeln 4 Stöße gibt. — Auch zum Bestimmen der Schwingungszahl von **a** hat Scheibler die Stöße benutzt; er verschaffte sich 56 Gabeln, welche von **a** bis a_1 so fortschritten, daß jede folgende 4 Stöße mit der vorhergehenden gab; hieraus folgte, daß $a_1 - a = 2a - a = a = 55 \cdot 4 = 220$ Schwingungen. Aehnlich ist Appunns Tonmesser eingerichtet, den man auch zur Bestimmung der absoluten Schwingungszahl eines Tones benutzen kann, indem man die Schwebungen zählt, die zwischen dem fraglichen Tone und einem der Zungentöne des Apparates stattfinden; die gesuchte Schwingungszahl ist dann gleich der Schwingungszahl des Zungentones vermehrt um die Zahl der Stöße. — Am vollkommensten ist Scheiblers Idee durchgeführt in Königs Tonmesser (1867), bestehend aus 331 Gabeln und 86 Stäben für alle Töne von c_{-3} bis c_6. — Wie die Schwebungen auch dazu beitragen, das Bestimmen der Schwingungszahlen mittels der Sirene zu erleichtern, ist schon früher (238.) erwähnt worden.

der auf. Doch ist hierbei vorausgesetzt, daß die Töne einfach seien; sind Obertöne mit denselben verbunden, so wird in dem letzten Falle der Klang nicht ganz verlöscht, der Grundton verschwindet, Obertöne bleiben; ist z. B. der Abstand der Erregungsstellen = 1/2 Wellenlänge des Grundtones, so ist er = 1 Wellenlänge der Octave, des ersten Obertones; wird also der Grundton aufgehoben, so wird der erste Oberton verstärkt; deßhalb springt bei manchen Interferenzen an der Stelle des verschwindenden Grundtones die Octave stark hervor.

Nachweise. In dem Röhrenapparate Fig. 146 ist der Theil dfg ausziehbar. Wird derselbe soweit ausgezogen, daß cd entweder = o, oder = 1/2, 2/2, 3/2 ... der Wellenlänge des Tones der Stimmgabel st ist, so hört man bei b den Ton deutlich, wenn auch die Röhren a und b viel länger sind. Beträgt aber cd = 1/4, 3/4, 5/4 ..... Wellenlänge, so

Fig. 146.



ist der Stimmgabelton bei b vollständig verschwunden. — Hält man eine Gabelröhre, deren gemeinschaftliche obere Röhre durch eine mit Sand bestreute Membran geschlossen ist, mit ihren zwei unteren Oeffnungen zu beiden Seiten einer Knotenlinie über benachbarte Theile einer tönenden Scheibe, so hüpft der Sand nicht; liegen aber zwischen den Oeffnungen zwei Knotenlinien, so geräth der Sand in lebhafte Bewegung. — Bläst man eine Helmholtz'sche Doppelsirene an, wenn die Löcher des oberen und des unteren Rades correspondiren, so wird der Ton verstärkt; wenn aber die Löcher des eines Rades mit den Zwischenräumen des anderen correspondiren, so verschwindet der Grundton und die Octave erscheint. — Zwei gleiche, neben einander stehende gedeckte Pfeifen wirken so auf einander, daß die Luft in die eine strömt, wenn sie aus der anderen tritt; die Töne sind daher in entgegengesetzten Phasen, sie verstärken sich nicht, sie bilden nur ein Sausen; bei offenen Pfeifen entsteht die Octave. — Die zwei Zinken einer Stimmgabel bilden Interferenzen; der Ton ist auf einer Hyperbel, die durch die 4 äußeren Zinkenkanten geht, sehr geschwächt; man kann dies schon durch Drehung einer tönenden Gabel vor dem Ohre merken; deutlicher tritt es hervor, wenn man eine tönende Gabel über einer passenden Resonanzröhre dreht. Schiebt man in dem Moment des Verschwindens über die eine Zinke eine Röhre, so erscheint der Ton wieder, weil jetzt die Interferenz unmöglich ist; ebenso wird der Ton einer Scheibe verstärkt, wenn man alternirende Sectoren durch die darüber gehaltene Hand dämpft, weil hierdurch Interferenzen beseitigt werden. Wenn (Gripon 1874) ein an einer senkrecht aufgestellten Membran hängendes Pendelchen in größerer Entfernung durch eine unisono tönende Stimmgabel heftig abgestoßen wird, so bleibt dasselbe in größter Nähe fast ganz in Ruhe und der Ton der Stimmgabel klingt sehr schwach. — Stefan (1868) hat den Apparat (Fig. 146) zur sichtbaren Darstellung der Interferenz von Longitudinaltönen benutzt; er befestigte an beiden Oeffnungen Glasröhren, die leichten Korkstaub oder dergl. enthalten und beide durch Korkstöpsel geschlossen sind. In die eine Röhre bringt durch den Stöpsel ein Glasstab wie eine Kolbenstange durch eine Stopfbüchse, und endigt in einem Korkkolben, der mit dem Stabe verschoben werden kann. Reibt man nun den Stab, so entstehen die bekannten Wellenfiguren in der Röhre des Korkes; in der zweiten Röhre bilden sie sich ebenfalls, wenn cd = 1/2, 2/2, 3/2 .... von der Wellenlänge des Tones ist; dagegen bleiben die Stäubchen in der zweiten Röhre ganz ruhig, wenn cd = 1/4, 3/4, 5/4 .... von der Wellenlänge ist.

266 **Die Schwebungen** (Scheibler 1814). Sind zwei gleichzeitig erklingende Töne nicht von gleicher Höhe, oder doch von geringem Höhenunterschiede, so entstehen abwechselnde Anschwellungen und Verminderungen der Tonstärke, welche man Schwe-

bungen nennt; die Anschwellungen nennt man Stöße oder Schläge, die Verminderungen Pausen, da sie häufig bis zum Verlöschen gehen. **Die Zahl der Schwebungen ist gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden Töne.**

Beweis. Wenn die zwei Töne gleichzeitig beginnen, so fällt anfänglich der Wellenberg des einen mit dem Wellenberge des anderen Tones zusammen, und auch die nachfolgenden Thäler fallen noch in einander; da aber die Welle des einen Tones länger ist als die des anderen, so wird schon nach der Bildung einer zweiten Welle der zweite Berg der kürzeren Welle dem zweiten Berge der längeren Welle um etwas voraus sein; dieses Voranseilen wird bei den folgenden Wellen immer beträchtlicher werden, endlich wird der Berg der kürzeren Welle auf das Thal der längeren treffen, der Ton wird bei gleicher Stärke der beiden Töne verschwinden. In der folgenden gleichen Zeit muß bei fortdauernder Wellenentwickelung der Berg der kürzeren Welle dem Thale der längeren immer mehr voraneilen, die Verminderung der Bewegung muß immer kleiner werden, bis die Berge der beiden Wellen zusammenfallen und dadurch Verstärkung der Bewegung oder des Tones stattfindet. So wechseln also an derselben Stelle Verminderung und Anschwellung des Tones; dieses findet so oft statt, als Schwingungen in gleicher Richtung auf einander treffen. Geschieht dieses z. B. im Anfange einer Secunde, so werden in den folgenden Zeittheilchen die an einer gewissen Stelle anlangenden Schwingungen immer weniger auf einander treffen; erst nach einem solchen Bruchtheile der Secunde gehen sie wieder nach gleicher Richtung, in welchem der eine Ton eine Schwingung mehr vollzogen hat als der andere; in den mittleren Zeitpunkten zwischen solchen Coincidenzen sind die Schwingungen einander entgegengesetzt, heben sich also auf. Hiermit ist das Gesetz bewiesen.

Nachweise. Appunn's Tonmesser hat 32 Zungen, von denen jede folgende 4 Schwingungen mehr gibt als die vorhergehende; man hört daher beim Anblasen von je zwei neben einander liegenden Zungen 4 Stöße, dagegen 8, 12, 16 . . . . ., wenn zwischen zwei tönenden Zungen 1, 2, 3 . . . . ruhende liegen. In den Pausen ist indeß hier keine Ruhe. Schweigende Pausen erhält man mit 2 ganz gleichen Stimmgabeln, von denen man die eine mit Wachs beklebt, oder mit gleichen gedeckten Pfeifen, von denen man die eine verstimmt, indem man nur die Hände vor das Mundloch hält oder die Lappen biegt oder den Deckel verschiebt. Claviertöne schweben, wenn eine Saite eines Tones gegen die andere verstimmt wird. Scheiblers Gesetz ist am leichtesten nachzuweisen mit der Doppelsirene von Helmholtz, an welcher man den Windkasten des einen Rades ebenfalls drehen kann; bei jeder Drehung entstehen so viele Schwebungen, als die Luftstöße der einen Sirene auf die Löcherzwischenräume des anderen Rades treffen. — Für das Auge wahrnehmbar lassen sich die Schwebungen auf mehrere Arten machen. Auf dem Phonautograph erhält man von zwei schwebenden Tönen eine Wellenlinie mit abwechselnd sehr hohen und kaum merklichen Bergen. — Befestigt man bei Lissajous' Lichtversuch (235.) den zweiten Spiegel ebenfalls an einer Stimmgabel, die ein wenig gegen die erste Gabel verstimmt ist, aber parallel zu derselben steht, so erhält man auf der Tafel eine abwechselnd steigende und fallende Lichtwelle. — Am schönsten aber sind die Schwebungen gleichzeitig zu hören und zu sehen mit Königs Interferenzflammenzeiger. Zwei gleiche Pfeifen stehen neben einander und sind mit Membrangehäuschen versehen, die mit einem und demselben Brenner und mit einem Gasreservoir verbunden sind. Die Flamme tanzt im Tacte nach den Schlägen hin und her, die man leicht durch Verstimmen der einen Pfeife erzeugen kann. In dem Spiegel erscheint bei dessen Drehung das Flammenbild bald in einzelne kleine Flammen getrennt, bald als zusammenhängender Berg.

Die Stöße wurden schon von Scheibler zum Stimmen vorgeschlagen. Hat man für jeden zu bestimmenden Ton zwei Gabeln, von denen die eine 4 Schwingungen per Secunde mehr, die andere 4 weniger als der zu stimmende Ton erzeugt, so ist dieser Ton auf seiner richtigen Höhe, wenn er mit jeder der beiden Gabeln 4 Stöße gibt. — Auch zum Bestimmen der Schwingungszahl von a hat Scheibler die Stöße benutzt; er verschaffte sich 56 Gabeln, welche von a bis a_1 so fortschritten, daß jede folgende 4 Stöße mit der vorhergehenden gab; hieraus folgte, daß $a_1 - a = 2a - a = a = 55 . 4 = 220$ Schwingungen. Aehnlich ist Appunns Tonmesser eingerichtet, den man auch zur Bestimmung der absoluten Schwingungszahl eines Tones benutzen kann, indem man die Schwebungen zählt, die zwischen dem fraglichen Tone und einem der Zungentöne des Apparates stattfinden; die gesuchte Schwingungszahl ist dann gleich der Schwingungszahl des Zungentones vermehrt um die Zahl der Stöße. — Am vollkommensten ist Scheiblers Idee durchgeführt in Königs Tonmesser (1867), bestehend aus 331 Gabeln und 86 Stäben für alle Töne von c_{-3} bis c_6. — Wie die Schwebungen auch dazu beitragen, das Bestimmen der Schwingungszahlen mittels der Sirene zu erleichtern, ist schon früher (238.) erwähnt worden.

267 **Die Rauhigkeit des Zusammenklanges.** Die Anzahl der als solche hörbaren Schwebungen ist nach den Forschungen von Helmholtz größer, als man bisher annahm; 4, 8, 12 in der Secunde können noch deutlich gezählt werden; in einer größeren Anzahl kann man sie zwar nicht mehr einzeln unterscheiden, man empfindet sie aber als eine fortwährende Unterbrechung des Tonflusses, als eine Rauhigkeit, welche nach Helmholtz bei 30—40 Schwebungen am unangenehmsten auf das Gehör wirkt; doch ist auch noch eine größere Zahl von Schwebungen in einem Intervall bei einiger Uebung zu erkennen und wird deßwegen auch von dem ungeübten Ohre empfunden; aber die Schwebungen werden immer undeutlicher, je größer ihre Zahl wird, und zwar wohl deßhalb, weil unsere Empfindung durch eine zu große Zahl gleicher Einwirkungen in sehr kurzer Zeit für dieselbe abgestumpft wird; nach Helmholtz soll die Grenzzahl der wahrnehmbaren Schwebungen bei 132 in der Secunde liegen. Dies ist einer der Gründe, warum die Haupttöne eines großen Intervalls keine Schwebungen zu Gehör bringen; denn für solche ist die Differenz der Schwingungszahlen sehr groß. Ein zweiter Grund dafür liegt in der Art, wie das Ohr die Schwebungen zur Wahrnehmung bringt. So wie nämlich die Schwebungen auf einer Membran sichtbar werden, so treten sie auch in dem Trommelfelle, in den Gehörknöchelchen, in den Corti'schen Fasern auf, weil diese Werkzeuge nicht ausschließlich auf einen Ton abgestimmt sind, sondern auch die Wirkung zweier Töne auf einander in sich aufnehmen. Indessen wirken doch auf jede Corti'sche Faser nur wenige, nahe beisammen liegende Töne mit annähernd gleicher Kraft; weiter von diesen entfernt liegende Töne regen dieselben nur sehr schwach an; folglich können auch nur die Schwebungen kleiner Intervalle sich ungestört in den Corti'schen Fasern wiederspiegeln; von einem großen Intervall mag wohl der eine Ton stark einwirken; der andere wird aber dann jedenfalls in der betreffenden Faser nur schwach auftreten, kann also auch nur schwache Schwebungen erzeugen. Wenn demnach das große Intervall $c_{-1} g_{-1}$ auch ebenso wohl 33 Schwebungen gibt wie das kleine $h_1 c_2$, so sind die ersteren doch viel schwächer als die letzteren. Die Rauhigkeit des Zusammenklanges hängt hiernach in einer zusammengesetzten Weise von der Größe des Intervalls und von der Zahl der Schwebungen ab.

Sehr hohe, kleine Intervalle klingen wegen allzugroßer Zahl der Schwebungen und sehr tiefe wegen zu geringer Zahl derselben weniger rauh als mittlere; tiefe, größere Intervalle geben zwar mehr Schwebungen, die aber eben der Größe des Intervalls wegen weniger hörbar sind; noch mehr Schwebungen geben gleiche Intervalle von mittlerer Lage, die deßhalb eine feinere und schärfere Rauhigkeit und eine größere Empfindlichkeit gegen das Verstimmen haben, als dies bei den tieferen Tönen der Fall ist, deren Rauhigkeit mehr dem Knarren ähnlich ist. Sehr tiefe Töne klingen schon für sich rauh, einmal weil man häufig die einzelnen Schwingungen als Stöße empfindet, und dann weil sie mit ihren eigenen Obertönen oder durch diese unter sich Schwebungen erzeugen. Die hohen, starken Baßtöne der menschlichen Stimme haben außerdem die hohen, nahe beisammen liegenden Obertöne von d_4 bis g_4, auf welche die Länge des Gehörganges abgestimmt ist, und die deßhalb sehr starke, unangenehme Schwebungen hervorbringen; für die höheren Stimmlagen des Menschen dagegen geben die höchsten Obertöne sehr viele und daher verschwindende Schwebungen; die höheren Menschenstimmen klingen deßwegen durchschnittlich angenehmer als tiefe. Werden Schwebungen in geringer Zahl sparsam angewendet, so bringen sie des Wankens der Töne wegen den Eindruck der Vergänglichkeit, eine trübe, melancholische Stimmung hervor; das Tremoliren der Singstimmen, der Violinen und Zithern, das Beben eines Orgelklanges, wenn demselben ein naheliegender Ton beigesellt wird, erzeugt diese Wirkung, die indessen bei langer Dauer oder öfterer Wiederholung unangenehm wird.

c. Die Consonanz und Dissonanz.

268 Die Rauhigkeit des Zusammenklanges ist die Ursache der Dissonanz; denn diese Rauhigkeit besteht aus einer größeren Anzahl von Schwebungen, aus einem

sehr raschen Wechsel von Anschwellungen und Schwächungen des Tones, aus einer rasch intermittirenden Wirkung auf die Gehörnerven. Jede zahlreich intermittirende Wirkung auf die Nerven wird aber bald unerträglich; wenn ein einziger elektrischer Schlag uns auch nur wenig empfindlich berührt, so ist doch eine rasche Folge gleicher Schläge kaum auszuhalten; Kitzeln, Kratzen kann bis zum Rasendwerden aufregen. Nichts wirkt unangenehmer und schädlicher auf das Auge, als ein rasches Verlöschen und Aufflammen, als das Flackern eines Lichtes; eine der schwersten Torturen soll in stundenlangem Aufschlagen von Wassertropfen auf den Kopf aus einiger Höhe bestanden haben. So wirkt auch eine nicht zu kleine und nicht zu große Anzahl von Schwebungen empfindlich auf das Gehörorgan; bei 30 bis 40 per Sec. ist die Wirkung am unangenehmsten. Schwebungen entstehen aber nicht blos durch das Zusammenklingen zweier nahe beisammen liegenden Grundtöne, sondern auch durch die Obertöne unter einander und mit den Grundtönen, sowie durch die Combinationstöne. **Die Dissonanz besteht in der Rauhigkeit des Zusammenklanges, welche bei Intervallen von verwickeltem Schwingungszahlenverhältnisse durch die schnellen Schwebungen der Grundtöne, der Obertöne und der Combinationstöne erzeugt wird. Die Consonanz der Intervalle von einfachem Schwingungszahlenverhältnisse dagegen beruht darin, daß die Obertöne dieser Intervalle entweder ganz oder theilweise zusammenfallen und daher keine oder nur wenige und schwache Schwebungen hervorrufen.**

Beweis. Am einfachsten kommen sämmtliche Erscheinungen der Consonanz und Dissonanz zur Klarheit, wenn wir die zwei Grundtöne der einfachsten Intervalle sammt ihren Obertönen, wie es in der folgenden Uebersicht geschehen ist, so zusammenstellen, daß immer die gleichen Töne unter einander stehen.

1. Einklang	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
od. Prime.	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
		2																		
2. Octave.	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
	c_1	c_1				c_2				g_2				c_3			e_3			g_3
		1																		
				3																
3. Quinte.	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
	g			g_1			d_2			g_2			h_2		d_3			f^3		g_3
				2																
						4														
4. Quarte.	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
	f		f_1			c_2			f_2		a_2			c_3		es_3		f_3		g_3
						3														
								5												
5. Terz.	c	c_1		g_1		c_2		e_2		g_2		b_2		c_3	d_3		e_3		fis_3	g_3
	e		e_1		h_1			e_2			gis_2		h_2		—d_3		e_3		fis_3	
								4												

Nennen wir einen Grundton mit sammt seinen Obertönen die Theiltöne eines Klanges, den Grundton den ersten Theilton, den ersten Oberton den zweiten Theilton u. s. w., so lassen sich die Eigenschaften der vorstehenden Intervalle leichter aussprechen. In dem Einklange fallen alle Theiltöne zusammen; ebenso fällt in der Octave jeder Theilton des höheren Klanges auf einen Theilton des tieferen; ganz dasselbe findet auch für die Quinte der Octave, überhaupt für alle solche Intervalle statt, deren einer Klang ein Oberton des anderen ist; nur wird bei größeren Intervallen der Unterschied zwischen Consonanz und Dissonanz immer mehr verwischt, und in den Octaven wird durch Beimischen höherer Obertöne der Klang etwas verschärft. Die genannten Intervalle sind *absolute Consonanzen*. — In der Quinte fallen innerhalb der oben angegebenen Grenzen 4, in der Quarte 3, in der Terz auch 3 Obertöne zusammen; bei der Quinte sind es aber tiefere als bei der Quarte, und bei der Terz sind sie besonders viel höher als bei der Quarte. Folglich sind Quinte und Quarte bessere Consonanzen als die Terz. Besonders wichtig sind die ersten coincidirenden Theiltöne, deren Ordnungszahl durch die darübergesetzten Ziffern erkennbar ist; bei dem Einklange sind es 1—1, bei der Octave 2—1, bei der

Quinte 3—2, bei der Quarte 4—3, bei der Terz 5—4, kurz dieselben Zahlen, die auch in dem Schwingungszahlenverhältnisse vorkommen. Je tiefer diese zuerst auf einander schlagenden Theiltöne sind, desto stärker sind sie, desto mehr wirken sie also auch consonirend; desto deutlicher aber werden außerdem die langsamen Schwebungen, die durch eine Unreinheit des Intervalls entstehen, desto deutlicher ist also auch jede Unreinheit zu erkennen, desto schärfer ist die Consonanz des Intervalls abgegrenzt; auch hierin sind die Quinte und die Quarte der Terz überlegen; außerdem die Quarte noch darin, daß sie mit der Octave eine Quinte, also eine bessere Consonanz bildet, während die Terz mit der Octave eine kleine Sexte, eine schlechtere Consonanz erzeugt. Endlich haben wir unser Augenmerk noch auf die nicht zusammentreffenden Töne zu richten; bei der Quinte liegen dieselben vor dem ersten zusammentreffenden Tone weit aus einander, bei der Quarte bilden f_1 und g_1 einen ganzen Ton, bei der Terz h_1 und c_2 einen halben Ton; es bilden also bei der Terz zwei Theiltöne eine scharfe Dissonanz, weniger bei der Quarte, gar nicht bei der Quinte; noch mehr treten Dissonanzen bei noch höheren Theiltönen auf, doch sind dieselben wegen zu großer Schwäche der Theiltöne und zu großer Zahl der Schwebungen unhörbar. — Merkwürdig ist der Zusammenhang zwischen den Theiltönen eines Intervalls und denen des benachbarten, etwa um einen Halbton des einen Klanges erniedrigten Intervalls. Wird z. B. in dem Einklange der eine Ton erniedrigt, so werden damit auch alle Theiltöne desselben um eben soviel erniedrigt; sie sind jetzt alle von denen des anderen nur wenig verschieden, geben mit allen schnelle Schwebungen, also die schärfsten Dissonanzen; umgekehrt, wenn wir diese Dissonanz um einen Halbton erhöhen, so coincidiren dann alle Theiltöne, die vorher dissonirten. Gleiche Betrachtung für die übrigen Intervalle gibt allgemein den Satz: In jedem Intervall dissoniren diejenigen Obertöne, die in den benachbarten Intervallen zusammenfallen. „Man kann in diesem Sinne sagen, daß jede Consonanz durch die Nähe der in der Tonleiter benachbarten Consonanzen gestört wird, und zwar um so mehr gestört wird, je niedriger und stärker die Obertöne sind, welche das störende Intervall durch ihre Coincidenz characterisiren, oder was dasselbe sagt, je kleinere Zahlen das Schwingungsverhältniß desselben ausdrücken." Die Quinte hat nun neben sich die Intervalle 7 : 5 und 8 : 5; diese können wenig oder gar nicht stören, weil der 7te und 8te Theilton schwach ausfallen oder ganz fehlen. Die Quarte wird gestört durch die Quinte und die Terz; die erste Störung ist gering, weil der Abstand ein großer ganzer Ton ist, die zweite kann unter Umständen bedeutend werden; daher ist über die Consonanz der Quarte lange Uneinigkeit unter den Musikern gewesen, die aber schon deßhalb unberechtigt ist, weil die Quarte durch Umkehrung zur Quinte wird. Der Quarte 4 : 3 steht die große Sexte 5 : 3 nahe, dieselbe verliert aber durch die Störung der Quinte, die nur um 10 : 9 absteht, an Werth als Consonanz, insbesondere aber dadurch, daß sie durch Umkehrung zur kleinen Terz wird. Die große Terz erfährt eine starke Störung durch die ganz nahe Quarte und die kleine Terz; sie steht aus diesem und den schon angegebenen Gründen der Quarte weit nach; sie wurde im Alterthume auch als Dissonanz angesehen und erst zur Zeit Francos von Cöln (1200) wurde sie als unvollkommene Consonanz zugelassen. Helmholtz erklärt Quinte und Quarte für vollkommene, große Terz und große Sexte für mittlere Consonanzen. Die kleine Terz 6 : 5 und die kleine Sexte 8 : 5 haben nach obiger Regel bei der ersten Coincidenz die Theiltöne 6 und 8, welche häufig genug fehlen; ihre Verstimmungen rufen daher kaum wahrnehmbare Schwebungen hervor, sie entbehren der scharfen Abgrenzung; außerdem werden sie beide durch benachbarte Intervalle stark gestört, die kleine Terz durch die große und den Grundton, die kleine Sexte durch die Quinte und die große Sexte; die kleine Terz und die kleine Sexte sind unvollkommene Consonanzen. Nach der Einfachheit der Zahlenverhältnisse würden jetzt die natürliche Septime 7 : 4 und die verminderte Decime 7 : 3 zu betrachten sein, ja sogar der kleinen Sexte eigentlich vorangehen; die kleine Sexte hat aber darin einen Vorzug, daß ihre Umkehrung die große Terz ist, während die eben angeführten Intervalle durch Umkehrung noch schlechtere Intervalle geben, als sie selbst sind. Außerdem passen dieselben nicht in die Tonleiter, sind daher nicht in die Musik aufgenommen. Durch diese Auslassung entsteht hier eine Kluft hinter den Consonanzen, durch welche sie sich von den Dissonanzen scheiden. Die schärfsten Dissonanzen sind die kleine Secunde und die große Septime, weil sie durch die absoluten Consonanzen gestört werden; etwas weniger ist dies der Fall für die große Secunde und die kleine Septime, die daher weniger scharfe, aber immer noch starke Dissonanzen sind; die kleine Septime ist sogar die mildeste Dissonanz, weil außer der mäßigenden großen Entfernung sie auch noch ihre Dissonanz dem ersten, häufig nicht starken Obertone verdankt. Eine starke Dissonanz ist noch die übermäßige Quarte, da sie durch die beiden vollkommenen Consonanzen gestört wird.

Wenn hiernach der Unterschied zwischen den Consonanzen und den Dissonanzen auf

die Schwebungen der Obertöne zurückgeführt ist, so würde die Folgerung natürlich sein, daß alle Intervalle von einfachen Tönen, wenn dieselben nicht gerade unter sich Schwebungen erzeugen, consonant sein müssen. Hier treten aber die Combinationstöne statt der Obertöne auf. Nähere Untersuchung zeigt, daß bei zusammengesetzten Klängen die ersten Differenztöne, auf die es hauptsächlich ankommt, in ihren Schwebungen mit den Obertönen übereinstimmen; folglich verstärken die Schwebungen der Combinationstöne die Dissonanzen und Consonanzen, und erzeugen sie, wo sie wegen Einfachheit der Töne eines Intervalls z. B. bei gedeckten Pfeifen nicht vorhanden sind; ja sie vermitteln auch die scharfe Begrenzung der Intervalle. Hat z. B. eine unreine Quinte die Zahlen 200 und 301, so gibt sie den Differenzton 101, der mit dem Grundtone den zweiten Differenzton 99 und mit diesem 2 Schwebungen bildet; ähnlich ist es bei der Octave und der Quarte; bei den Terzen und Sexten aber muß bis zum 4ten Differenztone gegangen werden, um Schwebungen zu erhalten; da diese wohl kaum wahrnehmbar sind, so behauptet Helmholtz und bestätigt es durch Versuche, daß unreine einfache Terzen und Sexten (für sich allein) z. B. bei gedeckten Pfeifen, Flaschen, Stimmgabeln ebenso gut klingen als reine, was natürlich sofort sich ändert, wenn andere Töne, andere Intervalle bildend, hinzutreten.

Nach Appunn wirken jedoch auch die Summationstöne und zwar besonders in der kleinen und eingestrichenen Octave, da sie hier überwiegend stark sind; sie wirken dissonirend z. B. in dem Intervall 8 : 5, da 13 zu beiden Tönen unharmonisch, consonirend z. B. in dem Intervall 6 : 4, da 10 zu beiden Tönen harmonisch ist.

Die Principien der Consonanz erklären nach Helmholtz auch die Entstehung der Tonleitern; aus der Harmonie können dieselben nicht, wie man vielleicht nach 239. vermuthen könnte, ursprünglich entstanden sein, da die Melodie und die Tonleiter lange vor Erfindung der harmonischen Musik vorhanden waren. Die Töne der consonirenden Intervalle bilden aber auch für den, der ihre Consonanz nicht kennt, regelmäßige Tonstufen in der Tonhöhe, welche mit den regelmäßigen Tonstufen in der Zeit, dem Rhythmus, verbunden, die Melodie erzeugen; sie erscheinen auch dem Gehöre als verwandt, das ihre Consonanz noch nicht kennt, wie z. B. der Octavengesang der Frauen- und Männerstimmen die Octave als den verwandtesten Ton characterisirt. Helmholtz nennt die Töne im ersten Grade verwandt, welche einen gemeinschaftlichen Theilton besitzen, und im zweiten Grade verwandt diejenigen, welche einem und demselben dritten Tone im ersten Grade verwandt sind; die Verwandtschaft des ersten Grades ist um so stärker, je näher die ersten oder der eine zusammenfallende Theilton dem Grundtone sind. Demnach ordnet sich die Verwandtschaft der Töne durch die darunter gesetzten coincidirenden Theiltöne in folgender Weise:

1. bei der aufsteigenden Octave

c_1	c_2	g_1	f_1	a_1	e_1	es_1
1 — 1	2 — 1	3 — 2	4 — 3	5 — 3	5 — 4	6 — 5

2. bei der absteigenden Octave

c_1	c	f	g	es	as	a
1 — 1	1 — 2	2 — 3	3 — 4	3 — 5	4 — 5	5 — 6

Ordnet man diese im ersten Grade verwandten Töne nach der Tonhöhe, so entstehen, wenn die letzten Töne der beiden Reihen, die mit den zweitletzten zu enge Intervalle bilden, wegfallen, folgende zwei Tonreihen:

1. $c_1 - e_1 - f_1 - g_1 - a_1 - c_2$,
2. $c_1 - as - g - f - es - c$ oder aufsteigend geordnet
3. $c - es - f - g - as - c_1$.

Vervollständigt werden diese Reihen, wenn wir sie mit den Verwandten der Quinte g verbinden, die wir in Folgendem von c_1 an geordnet unter diese Reihe setzen:

Verwandte von $c_1 \ldots c_1 - \quad - e_1 - f_1 - g_1 - a_1 - \quad - c_2$

Verwandte von $g \ldots c_1 - d_1 - es_1 - \quad - g_1 - \quad - h_1 - c_2$.

Durch Verbindung derselben entsteht 1. die vollständige aufsteigende Durtonleiter $c_1 - d_1 - e_1 - f_1 - g_1 - h_1 - c_2$, das lydische Geschlecht der Griechen,
2. die aufsteigende Molltonleiter

$c_1 - d_1 - es_1 - f_1 - g_1 - b_1 - c_2$.

Setzen wir ebenso unter die absteigende Reihe der Verwandten von c die absteigende Verwandtenreihe von g, jedoch nach c_1 geordnet:

Verwandte von $c_1 \ldots c_1 - \quad - as - g - f - es - \quad - c$

Verwandte von $g \ldots c_1 - b - \quad - g - \quad - es - d - c$,

so erhalten wir durch Verbindung: 3. die vollständige absteigende Molltonleiter $c_1 - b - as - g - f - es - d - c$, das äolische Geschlecht,
und 4. die phrygische Tonleiter

$c_1 - b - a - g - f - es - d - c$.

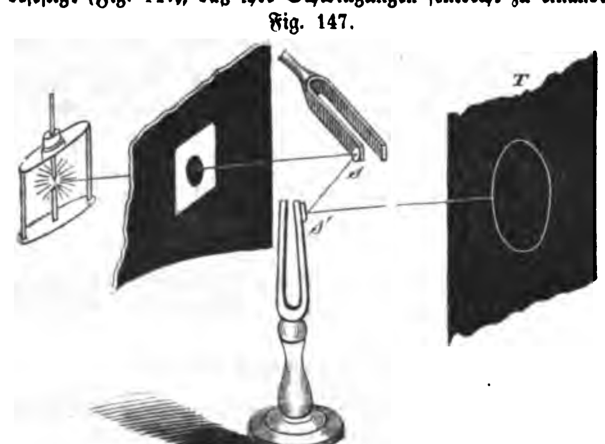
Auch die übrigen in der alten Musik vorkommenden Tongeschlechter lassen sich durch Verbindung mit den Verwandten der Unterquinte f, also durch die Principien der Consonanz ableiten.

269 Accorde. Da in verschiedenen Klangfarben die Obertöne nach Zahl, Höhe und Stärke verschieden sind, so müssen auch die Consonanzen und Dissonanzen auf verschiedenen Instrumenten verschieden klingen; in den Instrumenten, die einfache Töne und Klänge mit wenigen Obertönen geben, klingen die Dissonanzen weich und mager, fast wie Consonanzen; daher sind in der modernen Musik, die einen überschwellenden Reichthum von Dissonanzen enthält, jene Instrumente für sich allein unbrauchbar; ein Concert von gedeckten Pfeifen würde uns bald einschläfern, „schrecklicher als ein Concert von einer Flöte ist ein solches von zwei Flöten." Im Gegensatze hierzu werden Accorde der obertönereichen Streichinstrumente leicht rauh und scharf, kommen daher auch selten langgezogen, sondern nur vorübergehend bei denselben vor.

Consonirende Accorde sind solche Verbindungen von 3 oder mehreren Klängen, von denen jeder mit allen übrigen consonirt; ihre Zahl ist gering: 1. Grundton, Terz und Quinte; 2. Terz, Quinte und Octave (Terzsextenaccord); 3. Quinte, Octave und Decime (Quartsextenaccord). Wird überall statt der großen Terz die kleine gesetzt, so entstehen die drei Moll-Dreiklänge, während jene die drei Dur-Dreiklänge heißen. Der Unterschied beider liegt in den Combinationstönen. Sucht man die Combinationstöne von Dur-Dreiklängen, so findet man, daß diejenigen der ersten Ordnung und selbst noch die stärkeren der zweiten Ordnung nur Verstärkungen der Einzeltöne des Accordes erzeugen; dagegen kommen durch die Combinationstöne der Moll-Accorde, selbst durch die der ersten, noch mehr aber durch die der zweiten Ordnung Töne in den Accord, die demselben ganz fremd sind und ihm daher etwas Unklares und Verschleiertes geben, worin das Eigenthümliche der Moll-Accorde liegt; außerdem bilden die höheren Combinationstöne scharfe, aber sehr schwache Dissonanzen.

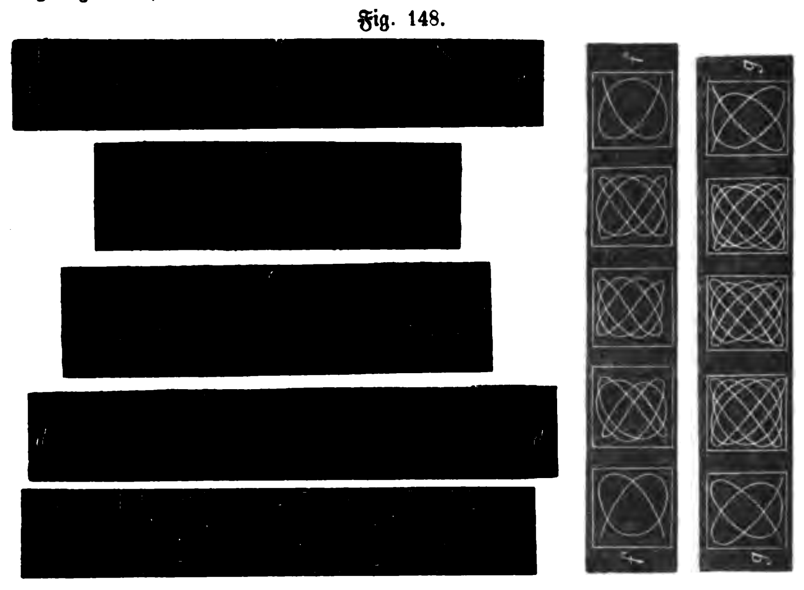
270 **Optische Darstellung der Consonanzen.** Man hat die Consonanzen nach Lissajous' Methode auch optisch dargestellt. Sind zwei Stimmgabeln von gleicher Tonhöhe so befestigt (Fig. 147), daß ihre Schwingungen senkrecht zu einander erfolgen, so erzeugt ein von beiden Spiegelchen s und s′ reflectirter Lichtstrahl auf der Tafel T im Allgemeinen eine Ellipse, die für den Fall, daß beide Gabeln gleichzeitig ihre Schwingungen beginnen und vollenden, in eine gerade Linie übergeht, in einen Kreis aber, wenn die eine Gabel um ¼ ihrer Schwingungszeit der anderen voraus ist. Die Entstehung dieser Figuren ist leicht erklärlich. Wird nun die eine Gabel durch Aufkleben eines Stückchens Wachs um ein wenig verstimmt, so ändert sich die Figur fortwährend, der Kreis geht durch eine immer schmäler werdende Ellipse in eine Gerade und diese durch die sich verbreiternde Ellipse wieder in den Kreis über u. s. f. (Fig. 148), weil eben die Verschiedenheit der Schwingungszeit die drei ersten genannten Fälle abwechselnd herbeiführt. Denn sind die 2 Gabeln um 1 Schw. in 1 Sec. verschieden und beginnen sie z. B. mit gleicher Phase, so sind sie nach 1 Sec. wieder in gleicher Phase, nach ½ Sec. aber in entgegengesetzter Phase und nach ¼ und ¾ Sec. um ¼ und ¾ in der Phase verschieden. Dreht man den Spiegel, wenn auf der Tafel ein fester Kreis steht, so entsteht die Einklangsfigur b (Fig. 148); wenn dagegen die eine Gabel verstimmt ist, entsteht die Verstimmungsfigur c. Ist die eine Gabel die Octave der anderen, so entsteht, wenn der Grundton der Octave um ¼ seiner Schwingungsdauer voraus ist, bei gleichem Beginne der Schwingungen nicht eine gerade Linie, sondern eine Parabel, die bei einiger Verstimmung der einen Gabel durch die Achterfiguren d in eine andere Parabel übergeht; e, f und g stellen in gleicher Weise die Uebergänge der Verstimmnngsfiguren für die Quinte, Quarte und Terz vor. Es ist leicht er-

Fig. 147.



sichtlich, daß mittels dieser Figuren ein Tauber Stimmgabeln zum Einklange oder zu jedem beliebigen Intervall mit solcher Reinheit stimmen kann, wie es dem feinsten Gehöre wohl nicht gelingen dürfte.

Fig. 148.



Aufg. 428. Wieviele Schwebungen per Sec. gibt das Intervall cd in den 4 mittleren Octaven? Aufl.: $d_{-1} - c_{-1} = 8$, $d - c = 16$, $d_1 - c_1 = 32$, $d_2 - c_2 = 65$. — A. 429. In der dreigestrichenen Octave ist $f_3 - e_3 = 77$; wo entsteht in dem Abstande = 2 Octaven dieselbe Zahl? Aufl.: $4x - x = 77$, daher $x = 26$; also $as_{-1} - as_{-3}$. — A. 430. Wo gibt ein Ton mit seiner kleinen Secunde gerade soviel Schwebungen als mit seiner Octave? Aufl.: Die Schwingungszahl des ersten Tones sei x, der zweite sei y Octaven entfernt; daher $^{16}/_{15}x - x = x \,.\, 2^{y+1} - x \,.\, 2^y$, woraus $c_{-2} - c_{-3} = cis_1 - c_1 = 16$. — A 431. Welche kleine Sec. gibt 10 Schwebungen? Aufl.: $^{16}/_{15}x - x = 10$, daher $x = 150$; dis — d. — A. 432. Welche große Quarte gibt die größte Rauhigkeit von 33 Schwebungen? Aufl.: $^{16}/_{15} \,.\, ^4/_3 \,.\, x - x = 32$; daher $x = 71$; $gis_{-1} - d_1$. — A. 433. Wenn ein Ton mit einer a_{-1}-Gabel 11 Schwebungen gibt, wie hoch ist er? Aufl.: $97{,}7 = g_{-1}$. — A. 434. Eine Saite von der Länge 1m stimmt mit einer Gabel; eine andere von der Länge 1,01m gibt 5 Schwebungen mit derselben; welchen Ton gibt die Gabel? Aufl.: $x : (x - 5) = 1{,}01 : 1$; hieraus $x = 505 =$ ca c_2. — A. 435. Im Appunn'schen Tonmesser sind 32 Zungen, von denen jede folgende mit der vorhergehenden 4 Schwebungen gibt; welches ist der tiefste Ton, wenn der höchste die Octave desselben ist? Aufl.: $x + 4 \,.\, 32 = 2x$; daraus $x = 128$. — A. 436. Wie viele Schwebungen geben die Grundtöne und Obertöne von c_{-1} und d_{-1}? Aufl.: $d_{-1} - c_1 = 8$; $d - c = 16$; $a - g = 22$; $d_1 - c_1 = 32$; $fis_1 - e_1 = 40$; $a_1 - g_1 = 44$; u. s. w.

271

4. Die Stärke des Schalles.

272 Die Stärke der Schallempfindung hängt von vielen Umständen ab: 1. Von der Entstehungsstärke des Schalles; diese ist proportional dem Quadrat der Amplitude und dem Quadrat der mittleren Schwingungsgeschwindigkeit. 2. Von der Beschaffenheit des Mediums, in welchem der Schall entsteht, und in welchem der Schall sich fortpflanzt; je dichter und gleichartiger das Medium ist, desto stärker ist der Schall. 3. Von der Menge der Theilchen des Fortpflanzungsmediums, denen der Schall durch die Schallquelle mitgetheilt wird; je größer die Zahl der gleich-

zeitig bewegten Mediumtheilchen ist, desto stärker ist der Schall. 4. Von der Zahl der Richtungen, in welchen der Schall ausgebreitet wird; je größer diese Zahl ist, desto kleiner ist auf jeder einzelnen Richtung die Schallstärke. Von der Entfernung des Ohres von der Schallquelle; die Intensität des Schalles ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung von der Schallquelle. 6. Von der Empfindlichkeit des Ohres; das Ohr ist um so empfindlicher, je weniger es durch andere Geräusche abgestumpft ist; das Ohr ist empfindlicher für hohe Töne als für tiefe.

Es ist ein Mangel in der Akustik, daß keine Einheit der Schallintensität besteht und kein Mittel zur Vergleichung, zur quantitativen Bestimmung der Schallintensitäten, wie die Optik ein analoges Mittel in dem Photometer besitzt. Durch das Helmholtz'sche Membranpendel (258.) und die sensitiven Flammen (253.) sind nun wohl Mittel geboten, sehr schwache Töne noch zu erkennen und nach ihrer Intensität abzuschätzen; allein ein genaues Maß bieten dieselben nicht. Alfred Mayer (1873) hat einen Apparat erdacht, durch welchen wenigstens die Intensitäten zweier Töne von gleicher Höhe nach Satz 5. verglichen werden können. In gleicher Entfernung von den 2 Tonquellen sind Resonatoren aufgestellt, die auf den Ton abgestimmt sind, und von welchen 2 Röhren, deren Längenunterschied gleich der halben Wellenlänge des Tones ist, nach einer König'schen Flammenkapsel gehen. Tönt nur die eine Tonquelle, so entstehen in dem rotirenden Spiegel die bekannten Schwingungszacken; tönt auch die andere in gleicher Stärke, so heben sich die Schwingungen auf und es erscheint im Spiegel das glatte Feuerband. Sind aber die Töne nicht von gleicher Stärke, so verschwinden die Zacken nicht; sie verschwinden erst dann, wenn die stärkere Tonquelle so weit entfernt wird, daß durch die Entfernung ihre Intensität der der schwächeren gleich geworden ist. Wenn eine und dieselbe Tonquelle n mal so weit entfernt wird, so klingt sie nach dem 5. Satze n^2 mal so schwach; wenn daher eine andere Tonquelle in n facher Entfernung ebenso stark klingt, so muß sie n^2 mal so stark sein. Man entfernt demnach die eine Tonquelle so weit, bis die Zacken verschwinden; dann verhalten sich die 2 Tonstärken wie die Quadrate der Entfernungen von dem Flammenzeiger.

Beweise und Nachweise. 1. Die Entstehungsstärke des Schalles ist um so größer, je größer die zur Schallerzeugung aufgewendete mechanische Arbeit ist, die sich bei dieser Erregung in Schwingungen verwandelt; diese Arbeit ist aber gleich der lebendigen Kraft der schwingenden Theilchen, welche durch das Quadrat der Schwingungsgeschwindigkeit und durch das Quadrat der Amplitude gemessen wird. Hohe Töne von gleicher Amplitude klingen viel stärker als tiefe, oft unerträglich stark. Mit Versuchen an der Sirene kann man zeigen, daß der Ton um so stärker wird, je mehr Löcher angeblasen werden, je größer also die Arbeit ist. — 2. Je dichter das Medium der Schallquelle ist, desto stärker ist der Schall, denn desto mehr Masse wird in Schwingungen versetzt. Füllt man die Lungen mit Wasserstoff, so klingt die Stimme schwach und hohl; auf hohen Bergen klingen Schüsse schwach, in sehr kalter Luft auf der Höhe der Meeresfläche klingt der Schall stark, am stärksten in der dichten Luft der Taucherglocken. Merkwürdig ist der starke Knall mancher zerspringenden Feuerkugeln trotz der großen Feinheit des Mediums, in welchem dieser Schall entsteht. Auch das Fortpflanzungsmedium hat einen ähnlichen Einfluß auf die Stärke des Schalles; am besten pflanzt sich der Schall durch feste Körper fort (236.) weniger gut durch flüssige, noch weniger durch luftförmige und gar nicht durch den leeren Raum. Von den ersten scheint Holz den Schall am besten zu leiten, worauf das Stethoskop (Laennec 1819) beruht. Aber auch die Erde ist ein guter Leiter; den Kanonendonner der Belagerung von Mainz (1793) hörte man bei Eimbeck (33 Meilen), den von Antwerpen (1832) im Erzgebirge (80 Meilen). Das Ticken einer Taschenuhr in Wasser hört man 7^m, in Oel 5^m, in Weingeist 4^m, in Luft nur 3^m weit. Stark geschwächt wird der Schall, wenn er aus der Luft in einen festen Körper übergehen soll; so dringt er nur sehr schwach durch Mauern und Wände; noch mehr geschwächt wird er durch distracte Stoffe, wie Watte, Sägemehl u. dergl., weil er alsdann oft aus Luft in einen festen Körper überzugehen hat. Man könnte hieraus schließen, daß der Schall durch die Luft, welche mit Nebel, Schnee, Regen, Hagel erfüllt ist, also durch optisch trübe Luft sich weniger gut fortpflanzt, als durch optisch klare Luft, und man hat auch häufig diese Meinung ausgesprochen; die sogleich zu erwähnenden Versuche Tyndalls (1873) haben jedoch die Unrichtigkeit derselben und die Richtigkeit des Gegentheils erwiesen. — Der Schall dringt leichter von dem Fuße eines Berges auf einen Gipfel als vom Gipfel herab; doch rührt dies mehr von der Schwäche des Schalles in der Höhe her als von dem Fortschreiten in das dichtere Medium. Bei Tage ist die Luft in steter Veränderung, Luftströme aller Art bringen Aenderungen der Dichtigkeit hervor; in der Nacht ist die Luft mehr gleichmäßig; daher ist der Schall bei

Tage schwächer als in der Nacht. Humboldt hörte trotz des Geheuls der Thiere in tropischen Nächten die Wasserfälle des Orinoco eine Stunde weit dreimal so stark als bei Tage. Ein ähnlicher Unterschied findet zwischen polaren und den übrigen Gegenden der Erde statt; die ruhige, kalte, dichte Luft verstärkt den Schall; Forster konnte sich mit einem 1/4 Meile entfernten Gefährten (bei Port-Bowen bei 28° Kälte) unterhalten; doch wirkt bei solchen Vorgängen auch noch der Einfluß 6. mit. Der Wind schwächt den Schall; am meisten in der dem Winde entgegengesetzten Richtung. Eine besonders starke Schwächung erfährt der Schall, wenn er aus einer Luftart in eine andere, aus trockener in dampfreiche Luft übergeht; dagegen pflanzt er sich durch trübe Luft, einerlei ob die Trübung von Nebel oder Regen, Schnee oder Hagel herrührt, weiter fort als durch gewöhnliche klare Luft, und viel weiter als durch wasserdampfreiche und hierdurch besonders klare Luft, so daß man den Satz aussprechen kann: optische Trübung ist akustische Klarheit, und optische Klarheit ist akustische Trübung. Versuche Tyndalls (1873) am Meere haben diese Sätze festgestellt. Die Töne riesiger Dampftrompeten, Dampfpfeifen und Dampfsirenen, sowie Kanonendonner wurden an trüben Tagen 3 bis 6 mal so weit gehört als an sonnenhellen Sommertagen; an einem trüben Tage hörte man gegen den Wind den Schall doppelt soweit, als an einem hellen Tage in der Richtung des Windes. Verschiedene Dichtigkeit konnte hier nicht die Ursache sein, da der Schall nur vom Meeresufer über das Meer hinging; Tyndall vermuthete daher, daß der über dem offenen Meere durch die Sonnenhitze reichlich entstandene Dampf die Ursache der schlechten Schallleitung sei, daß an dieser unsichtbaren Dampfwolke der Schall ebenso reflecirt werde, wie das Licht an der sichtbaren Nebelwolke; diese Vermuthung bestätigte das Echo, das fast ebenso stark vom Meere zurückkam, als der directe Schall war. Bestätigt wurde die Vermuthung weiter durch Versuche, nach welchen ein Schall durch wechselnde Schichten von Kohlendioxyd und Leuchtgas sich gar nicht fortpflanzt, während er durch eine gleich lange Luftsäule ungeschwächt fortging; der fortwährende Uebergang aus Luft in Dampf und umgekehrt scheint die Hauptursache der Schallschwächung durch dampfreiche Luft zu sein; der leichtere Gang durch Nebel u. s. w. ist jedoch hiermit nicht erklärt. — 3. Eine Saite kann nur einer geringen Luftmenge Bewegung mittheilen, klingt daher für sich allein sehr schwach; wird aber ihre Bewegung einem Körper mit großen Oberflächen übertragen, so versetzt dieser eine große Luftmenge in Schwingungen, und der Schall wird stark; darauf beruht die Anwendung der Resonanzen. — 4. Wenn der Schall sich nur nach wenigen oder nach einer Richtung fortpflanzen kann, so bleibt er fast ungeschwächt. Biot beobachtete die Fortpflanzung des Schalles durch die leeren Wasserröhren von Paris und fand, daß er sich durch eine 1000m lange Röhre mit einem Freunde flüsternd unterhalten konnte; hierauf beruhen die Communicationsröhren, mittels deren man Mittheilungen an entlegene oder abgesperrte Locale bringen kann, das Sprachrohr (Morland 1670) und das Höhrrohr. Nach Hassenfratz wirkt das Sprachrohr nicht durch innere Reflexion und hierdurch erzeugte mehr parallele Richtung der Schallstrahlen, sondern dadurch, daß der Schall vor seiner Ausbreitung eine größere Menge von Luft zum Mitschwingen bringt und so verstärkt wird. In ähnlicher Weise scheint es sich zu erklären, daß der Schall sich in der Hauptrichtung des schallenden Körpers am stärksten fortpflanzt, wie der Knall eines Geschützes, der Ton eines Blasinstrumentes in der Richtung des Rohres, die Stimme eines Sprechenden in der Richtung des Mundes u. s. w. (Das Ohr des Dionys). Nach neuesten Untersuchungen von Regnault (1868) nimmt die Stärke des Schalles in sehr engen Röhren ab und zwar um so schneller, je enger die Röhre ist. — 5. Für die Wirkung in die Ferne gilt das allen Wellenbewegungen gemeinsame Gesetz in 229. Die Stärke des Schalles steht demnach in umgekehrtem Verhältnisse mit dem Quadrat der Entfernung; mathematisch scharfe Nachweise hierfür sind unmöglich, weil kein Maßstab für die Schallstärke besteht; doch kann man sich annähernd durch gewöhnliche Beobachtungen überzeugen. — 6. Wie man bei Tage die Sterne nicht sieht, so verschwinden für das durch Tagesgeräusch abgestumpfte Ohr die leiseren Töne, die man in der ruhigen Nacht deutlich hört; auch schärft das Ruhen anderer Sinne das Gehör; mit geschlossenen Augen oder nach Verlust des Augenlichtes hört man besser. Auch ist das Ohr für hohe Töne empfindlicher als für tiefe; als Helmholtz durch gleich starkes Anblasen der Sirene hohe und tiefe Töne erzeugte, klangen die ersteren viel stärker. Unangenehme Geräusche, wie Kritzen, Klirren, Zischen u. s. w. sind wahrscheinlich mit sehr hohen unharmonischen Tönen vermischt.

5. Die Fortpflanzung des Schalles.

273 Der Schall pflanzt sich meist durch longitudinale Wellen fort, nur in seltenen Fällen durch transversale Wellen (236.); daher gelten die Sätze über die Ausbrei-

tung der Wellen auch für die Fortpflanzung des Schalles: 1. Der Schall pflanzt sich von seiner Quelle nach allen Richtungen fort, die man Schallstrahlen nennt. 2. Die Schallstrahlen sind in einem isotropen Medium gerade Linien, werden aber bei Uebergängen in andere Medien von ihrer Richtung abgelenkt. 3. Hohe und tiefe Töne, starke und schwache Klänge pflanzen sich (225.) mit gleicher Geschwindigkeit fort.

Nachweis. Daß der Schall sich nach allen Richtungen fortpflanzt, ist einfach dadurch nachgewiesen, daß man einen Ton rings um die Tonquelle hört; Abänderungen in der Schallstärke sind in 272. betrachtet worden. Die gerade Richtung der Schallstrahlen zeigt uns die Schwächung des Schalles durch einen in die gerade Linie zwischen Ohr und Schallquelle gebrachten Schirm; doch ist der Schallschatten viel schwächer als der Lichtschatten, weil die Schallbewegung viel langsamer ist und sich fortpflanzt als die Lichtbewegung, und weil daher nach dem Huyghens'schen Princip (230.) die seitliche Fortpflanzung der Wellenbewegungen stärker stattfinden kann. — Die gleiche Geschwindigkeit starker und schwacher, hoher und tiefer Töne zeigt uns das Anhören jedes vielstimmigen Musikstückes. Biot ließ an dem einen Ende der 1000^m langen Röhre solche Stücke spielen und hörte sie am anderen Ende in der richtigen Harmonie. Neueste Untersuchungen von Regnault und Kundt (1868) zeigten indeß, daß der Satz 3. nicht ganz ohne Einschränkung besteht; Regnault fand nämlich, daß sehr starke Töne sich etwas rascher als schwache fortpflanzen, wie auch schon Parry entfernte Kanonenschüsse eher als das zugehörige Commandowort gehört hatte; doch beziehen sich die Versuche Regnaults auf Röhren und nicht auf die freie Luft. Auch die Tonhöhe soll einen Unterschied der Geschwindigkeit bedingen; Kundts Versuche ergaben, daß tiefe Töne sich in Röhren langsamer fortpflanzen als hohe, und daß der Unterschied um so größer ist, je enger die Röhren sind. Regnault hatte dagegen durch eine lange Röhre die Obertöne eines Klanges später als die Grundtöne gehört; dies scheint sich indeß dadurch zu erklären, daß dieselben viel schwächer als der Grundton sind und sich deßhalb langsamer fortpflanzen. Denn auch Seebecks (1871) Versuche ergaben, daß hohe Töne sich in Röhren schneller fortpflanzen als tiefe; außerdem fand Seebeck, daß in Röhren überhaupt die Geschwindigkeit um einige Meter kleiner wird, und daß der Verlust dem Durchmesser umgekehrt proportional und von der Beschaffenheit der inneren Oberfläche abhängig ist. Weinholds Versuche (1872) scheinen die Folgerung zu erlauben, daß in Drähten ein Unterschied für hohe und tiefe, starke und schwache Töne nicht bemerkbar ist, daß also diese dem Gesetze 3. genauer folgen; denn an dem einen Ende eines 600^m langen Eisendrahtes, der an beiden Enden mit Resonanzkästchen versehen war, konnte ein am anderen Ende gespieltes Musikstück oder ein hier mit gewöhnlicher Stimme geführtes Gespräch so klar und deutlich gehört werden, als ob man an diesem Ende gewesen wäre.

274 **Die Geschwindigkeit des Schalles.** Für alle Wellenbewegungen gilt die Fl. (30), nach welcher $c = \sqrt{(e:d)}$, ein Werth der für die Fortpflanzung des Schalles in der Luft in 250. und 251. die Form (38) annahm $c = \sqrt{(1{,}42\ hs'g : s)}$. Hierin bedeutet s das spec. G. der Luft = 0,001293 für 0° C. Da die Wärme die Körper ausdehnt, die Luft für jeden Grad um $\alpha = 0{,}003665$, so wird bei höherer Temperatur die Dichte s geringer und zwar in dem Maße als das Volumen v größer wird. Hat aber ein Körper für 0° das Vol. v, so nimmt dasselbe für t^0 um $v\alpha t$ zu, wird also $v + v\alpha t$ oder $v(1 + \alpha t)$; es ist $1 + \alpha t$ mal so groß geworden; ebenso vielfach wird die Dichte kleiner, wird also $s:(1 + \alpha t)$. Setzen wir in die Gleichung für c diesen Werth statt s ein, so entsteht

$$c = \sqrt{[(1{,}42\ hs'g : s)(1 + \alpha t)]} \quad \ldots\ldots\ldots (40)$$

Werden hierin die bekannten Zahlenwerthe eingeführt, so ergibt sich für 0° C die Geschwindigkeit des Schalles $c = 333^m$,
wozu für jeden Centigrad etwa $\frac{1}{2}{}^m$ zu addiren ist. Außerdem sagt uns Fl. (30), daß die Geschwindigkeit unabhängig von dem Luftdrucke ist, da nach Mariottes Gesetz die Elasticität und die Dichtigkeit in gleichem Maße zu- oder abnehmen.

Durch zahlreiche und höchst genaue Versuche wurden diese Resultate bewährt gefunden. Die Mitglieder der Akademie zu Paris (1738), dann Arago, Mathieu, Prony, Humboldt, Gay-Lussac und Bouvard (1822), die holländischen Physiker Moll, van Beck und Kuytenbrower (1822) ließen an zwei gegenseitig sichtbaren Orten, deren Entfernung genau gemessen war, Kanonen lösen und beobachteten genau die Zeit, welche zwischen der Wahrnehmung des Lichtblitzes und des Kanonendonners lag; mit der Zahl der Secunden wurde

die Entfernung dividirt, und so erhielten die ersten $c = 337^m$, die zweite Beobachtungsgruppe $331{,}2^m$, die letzte Gruppe $332{,}26^m$. Durch die Beobachtungen von Bravais und Martens 1844 zwischen dem Faulhorn und dem Brienzer See wurde auch die Unabhängigkeit vom Luftdrucke festgestellt. Neue Versuche von Stone (1872) am Cap der guten Hoffnung ergaben das Resultat $332{,}306^m$.

Eine weitere Bestätigung ergibt eine andere Methode, die es auch erlaubt, die Geschwindigkeit des Schalles in anderen Gasen zu beobachten. Da die Wellenlänge λ der Weg ist, um den sich die Schallbewegung in der Schwingungszeit, in $^1/_n$ Sec., fortpflanzt, so ist der Weg in 1 Sec. oder die Geschwindigkeit $c = n\lambda$, wie auch die bekannte Fl. (25) ergibt; da nun die Länge l einer offenen Pfeife gleich der halben Wellenlänge und für gedeckte Pfeifen $= {}^1/_4$ der Wellenlänge ist, so ergibt sich für offene Pfeifen $c = 2ln$ und für gedeckte $c = 4ln$, was auch schon in Fl. (37) und (39) enthalten ist. Kennt man also die Schwingungszahl eines Tones und die Länge der Pfeife, die diesen Ton erzeugt, so kann man c berechnen. Wertheim fand hierdurch im Mittel $c = 331{,}7$ und fand außerdem den Einfluß der Temperatur bestätigt. — Da nach Fl. (30) bei verschiedenen Gasen, die unter gleichem Drucke stehen, also gleiche Elasticität besitzen, die Geschwindigkeit in umgekehrtem Verhältnisse mit der Dichte steht, so läßt sich die Geschwindigkeit des Schalles in anderen Gasen berechnen; so ist für Wasserstoff $c = 333 : \sqrt{0{,}0688} = 1280^m$. Ganz genau kann dieser Werth nicht sein, weil die Zahl 1,42 (s. 250), die wegen Wärmeentwickelung bei der Verdichtung und wegen Wärmeverlust bei der Verdünnung eingeführt wurde, bei verschiedenen Gasen einen etwas verschiedenen Werth hat. Wirklich erhält man auch, wenn Pfeifen mit verschiedenen Gasen angeblasen werden, wie es Chladni, Dulong und Wertheim gethan haben, und wenn man die Schwingungszahl des Tones mit der doppelten Länge der offenen Pfeife multiplicirt, etwas andere Werthe, als sie die obige Berechnung ergibt; die theoretischen Werthe kommen aber den beobachteten nahe, wenn man statt 1,42 die für das betreffende Gas aus der Wärmelehre erhaltenen Werthe substituirt. Für Wasserstoff erhielt Dulong 1269^m, für Sauerstoff 317^m, für Kohlendioxyd 262^m.

Unter den neueren Methoden zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ist die von Kundt (1866) hervorzuheben, deren Grundidee schon mehrmals (250. und 265.) erwähnt wurde. Die Abstände der durch die Staubfiguren erkennbaren Knoten geben die Länge der stehenden Luftwellen, die bekanntlich gleich der halben Länge der fortschreitenden Wellen ist, woraus nach der Fl. $c = n\lambda$ die Geschwindigkeit berechnet werden kann. Hiernach fand Kundt, wenn die Geschwindigkeit in der Luft $= 332{,}8^m$ ist, die im Wasserstoff 1284^m, im Kohlendioxyd 266^m, im Leuchtgas 533^m. Außerdem gab sich die Geschwindigkeit bei 100^0 um 56^m größer als bei 0^0; sie zeigte sich in weiten Röhren unabhängig vom Drucke der Luft, in engen aber mit dem Drucke zunehmend, während bei gleichbleibendem Drucke in engeren Röhren die Geschwindigkeit kleiner ist als in weiteren. Die Einflüsse der Röhrenwand beruhen nach Kundt auf Reibung und Wärmeaustausch der Luft mit den Röhrenwänden. — Wenn Kundt die Wellen (wie in 265.) durch einen geriebenen Stab, der an bestimmten Stellen eingeklemmt wurde, erregte, so konnte er durch Vergleichung der Tonwellenlänge des Stabes mit den Staubwellen auffinden, wie sich die Schallgeschwindigkeit in dem Stabe zu der in der Luft verhält; für Messing ergab sich dieselbe 10,87, für Kupfer 11,9, für Glas 15,2, für Stahl 15,3 mal so groß als für die Luft. Uebrigens war die Schallgeschwindigkeit in stabförmigen festen Körpern schon früher, von Chladni (1800), von Biot (1829), von Wertheim (1851) bestimmt worden. Chladni benutzte die Formeln $c = 2ln$ für offene Pfeifen und $c' = 2ln'$ für einen gleich langen beiderseits freien oder festen Stab (Fl. 36). Aus diesen zwei Gleichungen folgt $c' = (n' : n)\, c$; man hat also einfach das Verhältniß der Schwingungszahlen eines longitudinal tönenden Stabes und einer gleich langen offenen Pfeife mit der Geschwindigkeit in der Luft zu multipliciren, um die Geschwindigkeit in dem Stabe zu finden. Chladni und Wertheim fanden so, daß die Schallgeschwindigkeit in Blei 4, in Gold 6, in Zinn $7^1/_2$, in Silber 8—9, in Kupfer 11—12, in Eisen 15—17, in Glas 17, in Holz 11—17 mal so groß ist als in der Luft. Man erhält ziemlich dieselben Zahlen, wenn man die Schallgeschwindigkeit nach Fl. (30) $c = \sqrt{(e : d)}$ oder $c = \sqrt{(eg : s)}$ berechnet; d, die Masse der Cubikeinheit, ist gleich dem spec. G. s, dem Gewichte der Cubikeinheit, dividirt durch die Acceleration g. Die angeführten Werthe gelten nur für stabförmige Körper; für ausgedehnte Massen fester Körper muß nach Wertheim die Formel $c = \sqrt{(^3/_2\, eg : s)}$ benutzt werden, weil bei jeder Verlängerung oder Verkürzung nach vielfachen Versuchen eine Volumenveränderung eintritt, die einen Theil der Elasticität verzehrt; die Volumenveränderung beträgt $^1/_3$ der Verlängerung, verzehrt also auch $^1/_3$ der Elasticität, so daß dieselbe in ausgedehnter Masse nicht e, sondern $^3/_2\,e$ beträgt. Versuche hierüber sind noch nicht angestellt. — Für weiche Körper hat Stefan (1866) nach Chladnis Methode die Schallgeschwindigkeit bestimmt, indem er Stäbe von solchen Stoffen als Verlängerungen von Glasstäben anbrachte und sie durch Reibung

der Glasstäbe in Schwingung versetzte; für Wachs ergab sich bei 20° die Geschw. = 730m und für jeden Grad mehr um 40m abnehmend, für Unschlitt 360m, für Kautschuk 30—60m. — Die Geschwindigkeit in Flüssigkeiten läßt sich ebenfalls nach Fl. (30) $c = \sqrt{(e:d)}$ berechnen; auch hierin ist $d = s:g$; die Elasticität e ist aus der Zusammendrückbarkeit des Wassers, = 50 Milliontel durch 1 Atm. zu berechnen. Wenn hierfür 1 Atm. = hs', wo h der Barometerstand und s' das spec. G. des Quecksilbers, erforderlich ist, so ist für die Compression auf die halbe Länge die Kraft $e = hs' : 0{,}000\,050$ (nach 65.) nöthig. Hieraus ergibt sich die Schallgeschwindigkeit im Wasser $c = \sqrt{(hs'g : 0{,}000\,05\, s)} = 1425$ m. Versuche von Colladon und Sturm (1817) am Genfer See haben diese Zahl als richtig erwiesen. Dagegen fand Wertheim durch Versuche mit Pfeifen nur 1173m. O. E. Meyer (1874) ließ durch eine 3000m lange, mit Wasser gefüllte Bleiröhre einen Stoßimpuls gehen, und fand entsprechend der Wertheim'schen Angabe, daß derselbe 3 Sec. Zeit brauche. Die Erklärung Wertheims für den verzögernden Einfluß der Stabform wurde in 249. angegeben: durch die bei einer Längencontraction auftretende Querdilatation = 1/3 betrage die Gestaltänderung und daher auch die Elasticität nur 2/3, so daß die Fl. für c die Gestalt annehme = $c\sqrt{(\frac{2}{3}\, e:d)}$. Dort wurde indeß auch ausgeführt, daß Helmholtz diese Erklärung bestreite, weil eine fest umschlossene flüssige Säule unmöglich die Querdilatation ausführen könne, daß jedoch die Röhrenwand einen Einfluß ausüben müsse, der von ihrer Elasticität und Dicke, sowie von dem Durchmesser der Röhre abhängig sein dürfte, sowie endlich, daß Kundts (1874) Versuche diese Ansicht bestätigten.

275 **Reflexion des Schalles.** Der Schall wird als Wellenbewegung nach dem Gesetze (231.) zurückgeworfen: der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel. Wenn demnach Schallstrahlen senkrecht auf eine Wand fallen, so werden sie auch senkrecht zurückgeworfen; sie interferiren daher mit neu erregten Schallstrahlen zu stehenden Wellen, die durch Knoten getrennt sind. Külp (1858) hat die senkrecht von einer tönenden Orgelpfeife nach einer benachbarten Wand gezogene Grade untersucht und die Knoten als geschwächte Schallpunkte an solchen Stellen gefunden, welche dem Gesetze genügen, daß die reflectirte Welle um eine halbe Wellenlänge gegen die einfallende verschoben erscheint. Eine weitere Folgerung des Reflexionsgesetzes besteht darin, daß Schallstrahlen, die von dem Brennpunkte eines parabolischen Hohlspiegels ausgehen, von dem Spiegel parallel zur Achse desselben reflectirt werden, und, wenn sie auf einen parallel zu dem ersten aufgestellten Spiegel fallen, sich in dem Brennpunkte dieses zweiten Spiegels vereinigen; hält man in den Brennpunkt des einen Spiegels eine Taschenuhr, so hört man das Ticken derselben in dem des anderen. Ebenso vereinigen sich die Schallstrahlen, die von dem einen Brennpunkte eines elliptischen Gebäudes ausgehen, in dem anderen Brennpunkte, eine Erscheinung, die auch schon durch Bruchtheile von elliptischen Formen oder durch solche Körper hervorgerufen werden kann, die zufällig oder absichtlich in elliptischer Linie stehen; hierauf beruhen die Flüstergallerien. — Entsteht ein Schall nahe an einer Wand, so fällt der reflectirte Schall noch mit dem directen zusammen und erzeugt eine Verstärkung desselben; ist die Schallquelle weiter von der Wand entfernt, jedoch weniger als 17m, so entsteht der Nachhall; ist die Schallquelle weiter als 17m von der Wand entfernt, so entsteht ein Widerhall oder Echo, vorausgesetzt, daß der reflectirte Schall auch in das Ohr gelangen kann; doch scheinen diese Bedingungen zur Bildung des Echos nicht ausreichend zu sein, weil sonst diese Erscheinung viel häufiger sein müßte; wahrscheinlich ist eine solche Stellung der reflectirenden Gegenstände erforderlich, daß dieselben eine Art parabolischen oder elliptischen Spiegels bilden, in dessen Brennpunkt sich die reflectirten Schallstrahlen vereinigen und dadurch eine neue Schallquelle herstellen.

Das Ohr ist nämlich nicht im Stande, in der Secunde mehr als 10 articulirte Schalle getrennt zu empfinden. Wenn nun die reflectirende Wand sehr nahe, nur wenige Meter entfernt ist, so gelangt der reflectirte Schall in viel kürzerer Zeit als 0,1 Sec. nach dem directen ins Ohr; er verschmilzt daher mit demselben und verstärkt ihn, worauf, abgesehen von der Resonanz, der stärkere Klang desselben Schalles in kleineren geschlossenen Räumen als im Freien beruht. Wenn aber die Wand etwas weiter, jedoch noch nicht 17m entfernt ist, so gelangt der reflectirte Schall etwas später als der directe, aber immer

noch nicht 0,1 Sec. später ins Ohr; er bildet daher eine Verlängerung desselben, den Nachhall, der beim Reden, Singen u. s. w. die folgenden Silben verdeckt und daher undeutlich macht. Den Nachhall zu beseitigen, ist die Aufgabe der akustischen Bauart von Redehallen, Theatern u. s. w.; Regeln für dieselbe sind noch nicht bekannt. Je unregelmäßiger die Reflexion ist, desto akustischer scheint eine Halle zu sein; große glatte und ebene Flächen, regelmäßige Formen, wie Kugel- und Cylinderformen der Gebäude sind zu vermeiden, und die Wände sind möglichst reich zu gliedern. — Ist die Wand mehr als 17^m entfernt, so haben der directe und der reflectirte Schall zusammen einen Weg von mehr als 34^m zurückzulegen, wozu sie mehr als 333 : 34, also mehr als 0,1 Sec. Zeit nöthig haben; der reflectirte Schall gelangt mehr als 0,1 Sec. später ins Ohr als der directe, kann daher deutlich von demselben getrennt empfunden werden. Aus vielen verwirrten Widerhallen scheint der Nachhall in großen Räumen zu bestehen. Weiter entfernte Gegenstände können zwei- oder mehrsilbige Echo erzeugen, vielfache Reflexionen können ein vielfaches Echo zur Folge haben. Berühmte Echo sind: Bei Adersbach in Böhmen (7 Silben 3 mal), im Schlosse Simonetta bei Mailand (ein Pistolenschuß 50 mal), am Lurleifelsen (17 fach), zwischen zwei Thürmen bei Verdun (13 fach), zu Genetay (nicht an der Schallquelle, sondern an einer andern Stelle hörbar). Berühmte Flüstergallerien sind: in der Kuppel der Paulskirche, in der Kirche zu Glocester, in einem Zimmer der Pariser Sternwarte. Nach Versuchen von Tyndall (1873) geht der Schall nur schwach durch dampfreiche Luft; folglich muß von solcher der Schall reflectirt werden; dasselbe gilt nach Tyndall (1875) von ungleichmäßiger Luft und nach Cottrel (1874) von erhitzter Luft; hierdurch mag sich manches Echo auf dem Meere und manches andere unerklärte Echo erklären.

Brechung und Beugung des Schalles. Unter der Brechung des Schalles versteht man die Erscheinung, daß die Schallstrahlen eine Ablenkung von ihrer Richtung erfahren, wenn sie in ein anderes Medium übergehen. Sie geschieht nach dem Brechungsgesetze (232.); der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem constanten Verhältnisse, das dem Verhältnisse der Schallgeschwindigkeit in beiden Medien ($c : c'$) gleich ist. 276

Die Brechung des Schalles und die Geltung des Gesetzes wurden von Hajech (1857) nachgewiesen. Er benutzte hierzu Röhren, die mit verschiedenen Gasen und Flüssigkeiten gefüllt und durch Membrane geschlossen waren; die eine Membran stand auf der Achse der Röhre senkrecht, die andere schief. Wurden diese Röhren nun in einem Wandkanal zwischen zwei Zimmern befestigt, so wurde ein in dem einen Zimmer erzeugter Schall je nach der Beschaffenheit des Stoffes in der Röhre an verschiedenen Stellen des anderen Zimmers gehört; genaue Messungen der Winkel zeigten die Geltung des Gesetzes. — Wenn man nach Sondhauß hinter einen mit Kohlendioxyd gefüllten Collodiumballon eine Uhr hält, so hört man in einem bestimmten Punkte vor dem Ballon das Ticken sehr stark, weil in diesem Punkte die durch den Ballon gebrochenen Schallstrahlen sich vereinigen.

Mach (1863) hält die Beweiskraft dieser und ähnlicher Versuche für nicht ganz zweifellos, denn die Brechung könne dem Huyghens'schen Princip zufolge nur dann eine regelmäßige sein, wenn die Dimensionen der brechenden Fläche gegen die Wellenlänge sehr groß seien, was höchstens für sehr hohe Töne zutreffen könne; Aehnliches gelte für die Reflexion. Durch Versuche werden wenigstens für die Reflexion diese Einwürfe bekräftigt. Während das hohe, knisternde Geräusch kleiner elektrischer Funken in dem einen Brennpunkte eines elliptischen Gefäßes scharfe Staubfiguren im anderen Brennpunkte erregte, gaben starke Funken diffuse Figuren, und tiefe Knalle nur sehr verschwommene Staubgestalten; für die Brechung des Schalles konnten jedoch keine Resultate erhalten werden, und Mach glaubt, daß solche Versuche nur dann gelingen könnten, wenn so große Flächen wie Bergwände und Seespiegel zur Wirkung kämen. Bei den großartigen Seeversuchen Tyndalls hat sich allerdings die Folgerung aus der Wellentheorie, daß eine Dampfwolke, welche den Schall nicht durchlasse, denselben reflectiren müsse, sofort bewährt; allein auch bei den kleinen Experimenten, welche Tyndall und Cottrel in Folge der Seeversuche anstellten, bei welchen dieselben aber feinere Erkennungsmittel, nämlich sensible Flammen und Membranpendel, anwendeten, trat sie ebenfalls ein. In Folge derselben Versuche hat Reynolds (1875) eine Forschung angestellt, welche ergab, daß die Wirkung des Windes auf den Schall eine Brechung im Großen sei. Die Geschwindigkeit des Windes ist nämlich am Boden immer geringer, oft nur halb so groß als in der Höhe, z. B. in der Höhe 10, am Boden 5^m; pflanzt sich nun ein Schall gegen den Wind fort, so wird die Verdichtungswelle in der Höhe um 10, am Boden nur um 5^m verzögert; die ursprünglich auf dem Boden senkrecht stehende Verdichtungswelle stellt sich daher schief und zwar mit dem unteren Theile vorwärts, so daß der ursprünglich wagrechte Schallstrahl nach oben abgelenkt, gebrochen, und dadurch mit

anderen nach oben gerichteten Schallstrahlen vereinigt wird, was in der Höhe sogar eine Verstärkung des Schalles bewirken muß; der Schallstrahl, der sich mit dem Winde fortpflanzt, wird aus analogen Gründen nach unten gebrochen. Hieraus erklären sich manche früher dunkel gebliebenen Erscheinungen: warum der Schall gegen den Wind eine Strecke weit ganz deutlich ist und dann plötzlich verschwindet; warum man das Geläute einer Glocke mit dem Winde viel weiter hört, als man aus der Windgeschwindigkeit berechnen kann; warum man einen Schall oft in der Höhe besser hört als am Boden; warum über die glatte See der Schall weiter geht als über Land oder rauhe See; warum ein leichter Wind den Schall auf der See nicht beeinflußt u. s. w. Ja sogar die Tyndall'schen Erscheinungen erklären sich durch diese Brechung; denn in der feuchten und heißen Luft am Boden pflanzt sich der Schall schneller fort als in der kühleren und trockneren Höhe, es muß also der Schallstrahl nach oben abgelenkt und sonach unten geschwächt werden; bei Regen, Schnee u. s. w. ist aber die Luft oben und unten gleichmäßig, weßhalb keine Brechung stattfindet. Ob die letzteren Folgerungen richtig sind, soll noch durch Versuche bestätigt werden; wenn nämlich die Brechung wirklich die Ursache des Verschwindens des Schalles auf der See wäre, so müßte derselbe auf den Masten wieder hörbar werden.

Die Beugung des Schalles besteht darin, daß der Schall sich auch hinter einen Körper fortpflanzt, wenn er an dessen Grenze vorbeigeht, daß also die Schallstrahlen an den Grenzen umgebogen werden. Man kann ums Eck herum hören; indessen tritt doch eine bedeutende Schwächung des Schalles ein, wie jeder leicht erfahren kann, und in sehr geringer Entfernung von dem Ecke hört die Schallempfindung auf. Bei den Versuchen Tyndalls fuhren die Schiffe auch in den Seeraum, welcher durch eine Klippe von den gewaltigen Schallquellen getrennt war; der Schall erschien ganz bedeutend geschwächt. Eine Abwechselung von starken und schwachen Schallstellen in dem Beugungsraume ist in gewöhnlichen Fällen, an Straßenecken, hinter Thürwänden nicht zu bemerken, weil hier zu viele seitlich fortpflanzende Stellen vorhanden sind, so daß jede etwa am Rande erzeugte Schwächung durch zahlreiche, von andern Punkten ausgehende Schallwellen zugedeckt wird.

277 **Das Doppler'sche Princip** (1842). Wenn eine tönende Tonquelle und das Ohr sich einander nähern, so wird der Ton erhöht; wenn aber die Tonquelle und das Ohr sich von einander entfernen, so wird der Ton erniedrigt.

Beispiele und **Nachweise.** Wenn die Tonquelle und das Ohr ruhen, so gelangen an das Ohr in jeder Secunde n Verdichtungswellen, vorausgesetzt, daß der Ton per Sec. n Schwingungen vollzieht; nähert sich aber das Ohr der Tonquelle, so empfängt es mehr Verdichtungen, gerade so wie ein Schiff mehr Wellenberge durchfurcht, wenn es denselben entgegenfährt, als wenn es ruht. Umgekehrt weicht das Ohr einer Anzahl von Verdichtungen aus, wenn es sich von der Tonquelle entfernt. Im ersten Falle ist also der Erfolg gerade so, als ob das Ohr mehr Schwingungen per Sec. empfangen hätte, im zweiten so, als ob weniger Schwingungen in das Ohr gelangt wären; im ersten Falle erscheint der Ton höher, im zweiten tiefer als er ist. Ist z. B. im ersten Falle die Strecke, um die sich das Ohr in 1 Sec. nähert $= s$ und die Wellenlänge $= l$, so liegen auf dieser Strecke $s : l$ Wellen, oder auch $ns : c$ Wellen, weil $l = c : n$ ist. Es empfängt also das Ohr nicht nur die n Schwingungen des ursprünglichen Tones, sondern noch $ns : c$ dazu; folglich ist die Schwingungszahl $n' = n + ns : c = n(1 + s : c)$; für ein sich entfernendes Ohr ist $n' = n(1 - s : c)$. Leicht ergibt sich Aehnliches für das Nähern oder Entfernen der Tonquelle. — Nähert sich eine pfeifende Locomotive, so hört man deutlich das Höherwerden, und beim Entfernen das Tieferwerden des Tones. Buys-Ballot stellte (1845) an der Utrecht-Maarsen-Bahn Trompeter auf, nahm auch solche mit auf die Locomotive, und ließ durch feinhörige Musiker die Höhe der sich nähernden oder sich entfernenden Töne mit den constanten vergleichen; er fand so das Princip wie die Formel bestätigt. Mach ließ (1861) ein sehr langes Rohr, das an seinem Ende ein Pfeifchen trug, sich um eine durch die Mitte der Länge gehende Achse drehen und bemerkte beim Nähern und Entfernen Schwebungen des Tones. Rollmann (1871) befestigte an einer Schwungmaschine eine lange Stange, die an ihrem äußeren Ende eine große Glaskugel mit einer angeschliffenen Oeffnung trug, welche durch einen tangentialen Luftstrom wie ein Brummkreisel angeblasen werden konnte: bei der raschen Drehung blies dieselbe sich selbst an, und erhöhte und erniedrigte ihren Ton bei jeder Umdrehung einmal, wenn der Beobachter in der Richtung der Stange stand. Alfred Mayer hat (1872) zahlreiche Versuche mit 2 Stimmgabeln angestellt, durch welche alle Folgerungen des Princips bestätigt wurden; regte z. B. die eine Stimmgabel, wenn sie in größerer Entfernung stand, die andere zum Mittönen an, so verschwand der Ton der letzteren, wenn die erstere derselben genähert wurde.

Akustische Anziehung und Abstoßung (Schellbach 1870). Da diese Erscheinung vielleicht einen Anfang zur Lösung des Räthsels der Anziehung überhaupt bilden kann, so

möge sie hier kurz angedeutet werden: Die Schallschwingungen eines elastischen Mittels ziehen specifisch schwerere Körper nach dem Mittelpunkte der Erschütterung hin und stoßen specifisch leichtere ab; hängt man z. B. einen luftgefüllten Ballon von Goldschlägerhaut, der natürlich im Ganzen schwerer als Luft ist, in der Nähe einer tönenden Stimmgabel auf, so nähert derselbe sich dem Resonanzkästchen bis zur Berührung; ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon dagegen, der durch einen Faden am Steigen gehindert ist, wird heftig zurückgestoßen. Die Ursache der Erscheinung liegt jedenfalls nicht im Unterschiede der absoluten Gewichte; denn die Abstoßung des Wasserstoffballons findet auch statt, wenn derselbe durch angeklebtes Wachs bis zum Sinken beschwert, aber durch Aufhängen am Fallen gehindert ist. Eine ähnliche Erscheinung hat Guyot schon 1834 beobachtet und Dvorak hat seit 1875 eine größere Anzahl hierher gehöriger Versuche angestellt.

278 Aufg. 437. Ein Brunnen ist 100^m tief; nach wieviel Sec. hört man einen Stein aufschlagen? Aufl.: $\frac{1}{2} . 9,808 . x^2 = 100$; hieraus die Fallzeit $x = 4,5$; die Schallzeit $= 100 : 333 = 0,3$; daher die gesuchte Zeit $= 4,8$ Sec. — A. 438. Wie tief ist ein Schacht, in welchem man einen Stein nach 6 Sec. aufschlagen hört? Aufl.: Die Fallzeit sei x, dann ist $\frac{1}{2} . 9,808 . x^2 = 333 (6 - x)$; hieraus $x = 5,6$ Sec.; daher der Fallraum $= 453^m$. — A. 439. Wie weit ist ein Gewitter entfernt, wenn der Donner 20 S. nach dem Blitze beginnt? Aufl.: 6660^m. — A. 440. Wenn man annimmt, daß die Dauer des Donners von der Länge des Strahles herrührt, wie lang ist dann der Blitz, dessen Donner 1 Min. rollt? Aufl.: 19980^m. — A. 441. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit im Leuchtgas; sp. G. 0,5? Aufl.: 477^m. — A. 442. Wie groß ist dieselbe im Quecksilber? Aufl.: Nach 274. $= 1576^m$. — A. 443. Ein Gußstahldraht von 7,7 sp. G. und 20000^{kg} Elasticitätsmodul hat welche Schallgeschwindigkeit? Aufl.: Fl. $c = \sqrt{(eg : s)} = 5000^m$. — A. 444. Ein Silberstab von $0,4^m$ Länge gibt an einem Ende festgeklemmt und gerieben den Ton a_3; wie groß ist die Schallgeschwindigkeit? Aufl.: 2784^m. — A. 445. Wie groß ist die Schallgeschwindigkeit in der Luft bei 3000° C.? Aufl.: Nach Fl. (40) ist $c = 3994^m$. — A. 446. Wie schnell muß sich ein Ohr dem Tone a_1 nähern, um h_1 zu hören; wie schnell um die Octave zu hören; wie, um nichts zu hören? Aufl.: $41\frac{5}{8}{}^m$, 333^m per Sec. nähern, 333^m per Sec. entfernen. — A. 447. Die Schwingungszahl für eine sich um s per Sec. nähernde oder entfernende Tonquelle, die an sich n Schw. gibt, zu entwickeln? Aufl.: $n' = nc (c \mp s)$. —

Sechste Abtheilung.

Die Lehre vom Lichte oder die Optik.

1. Definition der Optik.

279 **Begriff und Wesen des Lichtes.** Das Licht ist die Kraft, welche uns die Körper sichtbar macht, wenn es entweder von den Körpern selbst erzeugt wird, oder wenn es auf dieselben fällt und von ihnen zurückgeworfen wird. Körper, welche selbständig Licht erzeugen, werden selbstleuchtend oder Lichtquellen genannt; diejenigen Körper aber, welche erst durch fremdes Licht sichtbar, lichtgebend, leuchtend werden, nennt man dunkle Körper. — Das Licht besteht aus transversalen Schwingungen des Aethers, deren Anzahl in einer Secunde 400 bis 800 Billionen beträgt. Jede dieser verschiedenen Schwingungszahlen bedingt den Eindruck einer bestimmten Farbe; wenig verschiedene Schwingungszahlen aber erzeugen auch nur wenig verschiedene Farben; die geringste Schwingungszahl von 400 Billionen kommt dem Roth zu; dann folgen Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett, das aus der größten Zahl von Aetherschwingungen besteht. Im gewöhnlichen Lichte stehen die Aetherschwingungen nach allen nur denkbaren Richtungen auf dem Strahle senkrecht; sind aber die Schwingungen einander parallel, so zeigt das Licht außergewöhnliche Eigenschaften und wird polarisirtes Licht genannt.

Diese Ansicht über das Wesen des Lichtes ist nur eine Hypothese, die man die Undulationstheorie des Lichtes nennt, und für welche Huyghens (1690) den ersten Grund legte; im vorigen Jahrhundert hatte sie nur den großen Euler als Verfechter; bei den übrigen Naturforschern war die Emanationstheorie Newtons (1692) in allgemeiner Geltung, welche das Licht als einen höchst feinen, den leuchtenden Körpern entströmenden Stoff betrachtete. Den stärksten Stoß erhielt diese Theorie durch die Interferenzerscheinungen (7.), welche gleichzeitig die Hauptstütze der Undulationstheorie wurden. In neuerer Zeit (1854) hat Foucault eine Thatsache gefunden, die der Emanationstheorie direct widerspricht; nach dieser Theorie ist nämlich das Brechnngsgesetz (Fl. 32) nur möglich, wenn das Licht in dem dichteren Medinm sich schueller fortpflanzt als in dem dünneren; Foucault hat aber durch höchst sorgfältige Versuche gefunden, daß die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser nur 3/4 von der in der Luft ist, eine Thatsache. die der Undulationstheorie nicht blos entspricht, sondern von derselben längst angenommen, ja sogar theoretisch entdeckt worden war. Denn es war längst bekannt, daß bei dem Uebergange des Lichtes aus Luft in Wasser der Sinus des Einfallswinkels zu dem des Brechungswinkels sich wie 4:3 verhalte; nach der Undulationstheorie (232.) ist aber dieses Verhältniß gleich dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten. Die Undulationstheorie hatte also die Entdeckung Foucaults längst vorausgesagt; ebenso kann sie auch jetzt noch Vieles voraussagen; so z. B. daß man bei directer Messung die Geschwindigkeit des Lichtes im Gase = 2/3 von der in der Luft finden wird. — Fresnel entdeckte (1817) durch Rechnung auf dem Grunde der Undulationstheorie die circulare Polarisation des Lichtes mit allen ihren Consequenzen, ohne daß Jemand eine Spur dieser Erscheinungen gesehen hatte, während sie sofort nach der theoretischen Entdeckung durch Versuche Jedermann offenbar wurden, und jetzt praktisch wichtig und z. B. in Zuckerfabriken Jedem geläufig sind. Wenn nämlich ein Pendel in seiner höchsten Lage senkrecht zu seiner Schwingungsebene einen Stoß erhält, so muß es einen Kreis oder eine Ellipse beschreiben; ebenso müssen zwei senkrecht auf einander treffende Aetherschwingungen, von denen die eine in der Phase um 1/4 der Schwingungsdauer voraus ist, eine kreisförmige oder elliptische Schwingung hervorrufen, also circular polarisirtes Licht erzeugen. Dieses Licht, das sich auffällig von dem gewöhnlichen und von dem geradlinig polarisirten Lichte unterscheidet, und dessen Eigenschaften in keiner Weise mit der Emanationstheorie erklärlich sind, ist ein Product der Undulationstheorie; ebenso sind manche Erscheinungen der Spectral-Analyse aus der Theorie gefolgert und durch Versuche bestätigt gefunden worden. Solche Gründe sprechen für die Undulationstheorie; außerdem gelingt es, mittels derselben alle Lichterscheinungen ungezwungen sowohl der Art als der Größe nach abzuleiten und zu erklären, so daß kein Physiker mehr an der Wahrheit derselben zweifelt.

Das Licht unterscheidet sich demnach vom Schalle durch den Stoff der Schwingungen (hier Aether, dort Körperstoff), durch die Richtung der fortpflanzenden Schwingungen (hier transversal, dort longitudinal), durch die Zahl der Schwingungen (hier 400—800 Bill., dort 14—40000) und durch die Amplitude der Schwingungen (hier unendlich klein, dort meßbar groß). Außerdem pflanzt sich das Licht sehr viel schneller fort als der Schall (40000 M., dort 333m in der Luft); das Licht geht in dichteren Körpern langsamer, der Schall schneller voran als in der Luft. Beide stimmen darin überein, daß unter und über den angegebenen Schwingungszahlen die Empfindung von Auge und Ohr zu Ende ist, sodann darin, daß die verschiedenen Schwingungszahlen verschiedene Empfindungen erzeugen (hier die verschiedenen Farben, dort die verschieden hohen Töne).

2. Entstehung des Lichtes.

280 **Die Lichtquellen.** Die Quelle alles Lichtes, mit Ausnahme des Fixsternlichtes, ist die Sonne; denn auch die irdischen Lichtquellen verdanken ihr Licht der Sonne. Nach Bouguer (1725) ist das Sonnenlicht gleich dem von 11664 Wachskerzen in 16″ par. Entfernung, und Millionen, ja Billionen mal so stark als das Licht der Fixsterne. — Die irdischen Körper werden zu Lichtquellen, wenn sie bis zu einer gewissen Temperatur erhitzt werden; nach Draper (1847) fangen alle Körper bei 525° an zu glühen und zwar mit rothem Lichte und erreichen bei 1170° die Weißgluth. Die gewöhnlichen irdischen Lichtquellen beruhen auf der durch Verbrennung entstehenden Hitze, durch welche in der Flamme schwebende Theilchen fester Stoffe zur Gluth gebracht werden. Auch der elektrische Strom und der elektrische

Schlag (Funken und Funkenstrom) können so hohe Temperaturen und so heftige Erschütterungen erzeugen, das hierdurch Licht entsteht.

Die Leuchtkraft des Vollmondes oder die Intensität oder Stärke des Mondlichtes ist nach Zöllner der 600 000ste Theil von der des Sonnenlichtes, die von α Centauri nach Herschel der 16 000 Millionte Theil, die des Sirius nach Wollaston der 20 000 Millionte Theil, die des Jupiter der 5000 Millionte Theil und die des Neptun der 80 Billionte Theil von der Intensität des Sonnenlichtes (Zöllners Astrophotometer). Das stärkste irdische Licht, das elektrische Kohlenlicht, hat bei Anwendung von 50 Bunsen'schen Elementen, 1/4 der Stärke des Sonnenlichtes, während das Drummond'sche Kalklicht oder Siderallicht nur 1/16 dieser Stärke erreicht; stark ist auch das künstliche Licht des in reinem Sauerstoff brennenden Phosphors, sowie das Magnesium- und das Zinkmagnesiumlicht. Mittels der neuen magnetelektrischen Maschinen (Lichtmaschinen) kann man elektrisches Licht von 1—30 000 Normalkerzen Lichtstärke, also stärkeres wie das Sonnenlicht erzeugen.

Die Ursache des Sonnenlichtes ist die hohe Temperatur dieses Weltkörpers; nach neueren Forschungen herrscht auf der Sonne eine Hitze von Hunderttausenden von Graden, die sich entweder durch Zusammenziehung der Sonne oder durch Einstürzen kleinerer Weltkörper, Meteoriten und Kometen, oder durch beide Wirkungen zugleich noch in undenkliche Zeiten zu erhalten scheint. Folglich sind die Sonnenmoleküle in Schwingungen bis über 1000 Bill. per Sec. begriffen; diese Schwingungen übertragen sich auf den Aether der Sonne und pflanzen sich so nach den Gesetzen der Wellenbewegung durch den Aether des Weltraumes nach allen Richtungen fort. — Die Ursache des Glühlichtes der irdischen Körper liegt ebenfalls in ihrer Wärme; denn bekanntlich besteht dieselbe bei den festen und flüssigen Körpern aus Schwingungen der Moleküle, welche bei steigender Temperatur nicht blos an Weite, sondern bei vielen Molekülen auch an Zahl zunehmen. Bei 525° ist so die Schwingungszahl bis zu 400 Bill. gestiegen, bei 655° haben sich orangefarbige, gelbe, grüne Gluthen darunter gemischt, mit 800° sind auch blaue Gluthen entstanden und bei 1170° sind alle noch möglichen Stufen des Violett hinzugetreten, und so entsteht durch Mischung aller Farbengluthen die Weißgluth. — Die Verbrennung ist eine chemische Vereinigung, d. i. ein Zusammentreten verhältnißmäßig sehr weit von einander entfernter Atome zu größtmöglicher Nähe vermöge der Anziehung der Atome gegen einander; da diese Anziehung bei wachsender Annäherung immer größer wird, so steigt die Geschwindigkeit in vervielfachtem Maße; bei größtmöglicher Annäherung aber ist die fortschreitende Bewegung plötzlich zu Ende, die ganze producirte Arbeit verschwindet und muß daher in Schwingungen, in Wärme verwandelt werden, mit deren Erhöhung die Lichtentwickelung verbunden ist.

Die Phosphorescenz. Unter Phosphorescenz versteht man das Leuchten der Körper bei gewöhnlicher Temperatur; dasselbe ist indessen so schwach, daß es nur in der Dunkelheit sichtbar ist, daß also das Auge sich von stärkeren Reizen erst erholen und für so schwache Reize empfänglich gemacht werden muß. Der Name rührt von dem Leuchten des Phosphors im Dunkeln her, obwohl vor der Entdeckung des Phosphors das Leuchten des Diamantes (Albertus Magnus 12. Jahrh.) und des Bologneser Schwerspathes (Vincenzio Cascariolo 1602) bekannt war. Die Körper phosphoresciren durch verschiedene Ursachen: 1. Langsame Verbrennung; das Leuchten von faulendem Holze, faulenden Fischen, von faulendem Fleisch scheint hierauf zu beruhen; auch das Leuchten des Phosphors wird von Vielen als Folge langsamer Oxydation bezeichnet, und das Leuchten desselben im leeren Raume, in reinem Stickstoff u. s. w. der Unmöglichkeit zugeschrieben, den Sauerstoff absolut zu entfernen. 2. Insolation, d. i. Bestrahlung durch die Sonne oder ein grelles künstliches Licht. Nach Becquerel (1840—60) leuchten durch Insolation alle Körper nach, einige lange, die meisten nur sehr kurze Zeit, am kürzesten Flüssigkeiten und Gase. Am besten phosphoresciren künstliche Leuchtsteine: Verbindungen von Schwefel mit Alkalimetallen oder mit Erdalkalimetallen; der Bologneser Leuchtstein, eisenfreies Schwerspathpulver mit Traganth geglüht; der Balduin'sche Phosphor (1777), mit Scheidewasser getränkte Steinkreide zu Pulver gestoßen, mit Eiweiß gemengt und geglüht; der Canton'sche Phosphor (1768), aus Austernschalen und Schwefelpulver gemengt. Natürliche Phosphore sind besonders die Mineralien des Calciums und Bariums, vorzüglich Flußspath (Chlorophan). 3. Mechanische Processe: Kiesel, Zucker, Kreide, Glimmer leuchten beim Zerschlagen oder Spalten. 4. Wärme:

281

die Phosphore durch Insolation leuchten auch durch Erwärmen; manche Metalle leuchten durch Erwärmen ziemlich stark, dagegen durch Insolation kaum merklich. 5. Elektricität: alle Phosphore leuchten durch elektrische Funkenströme, und ihre sonstige Leuchtkraft wird hierdurch erhöht und neu erweckt; das Nachleuchten vieler Geißler'schen Röhren wird einer Spur wasserfreier Schwefelsäure zugeschrieben; Manche erklären auch das Meeresleuchten durch elektrische Ausströmungen von Meeresthieren. 6. Der Lebensproceß vieler Thiere und Pflanzen: Johanniswürmchen und Leuchtkäfer, viele Infusorien und Zoophyten, Mollusken und Schalthiere (Meeresleuchten), sowie Kapuzinerkresse und Nachtkerze, Ringelblume und Goldblume u. a. Pflanzen leuchten in der Nacht.

Die Phosphorescenz durch Insolation kann in ähnlicher Weise wie das Mittönen erklärt werden. Die schwingenden Aetheratome übertragen allmälig ihre Bewegung auf die Körpermoleküle, wobei sie die Schwingungszahl gewöhnlich erniedrigen; die Körpermoleküle setzen, wenn die Insolation aufhört, vermöge ihrer größeren lebendigen Kraft die Schwingungen noch fort und übertragen dieselben jetzt umgekehrt auf die Aetheratome. Ein Räthsel ist allerdings noch, warum die Körper verschieden lange nachleuchten; Emsmann (1857) nimmt an, daß eine gewisse Coërcitivkraft die Moleküle in ihrem Zustande erhalte, und daß dieselbe verschieden groß sei; bei kleiner Coërcitivkraft könnten die Moleküle leicht die Aetherschwingungen annehmen, aber ebenso rasch auch wieder verlieren, während bei großer Coërcitivkraft die Moleküle schwieriger in erhöhte Bewegung zu setzen seien, dieselbe aber dann auch länger behielten und dadurch länger phosphoresciren müßten. Hiermit scheinen die Resultate Becquerels mittels des Phosphoroskops zu stimmen; der phosphorescirende Körper befindet sich in diesem Apparate zwischen zwei Scheiben mit sectorförmigen Ausschnitten, die nicht auf einander passen, so daß von der einen Seite her der Körper bestrahlt und von der anderen Seite beobachtet werden kann, ohne daß der Beobachter von dem directen Lichte getroffen wird; die zwei Scheiben können sehr schnell, aber auch langsam gedreht werden, wodurch die Bestrahlung, wie die Beobachtung der Phosphorescenz nach Belieben continuirlich oder momentan gemacht werden und die Dauer der Phosphorescenz berechnet werden kann; sie liegt für verschiedene Körper zwischen 35 Stunden und 0,0001 Sec. — Die Phosphorescenz wird vorwiegend durch Strahlen erzeugt, die mehr als 800 Bill. Schwingungen machen, durch die sogen. ultravioletten Strahlen; daher entsteht sie auch durch elektrisches und durch Magnesiumlicht, nicht aber durch Kerzen- und Gaslicht, weil diesem die ultravioletten Strahlen fehlen (330.). — Da die Moleküle der Körper meist schon in Schwingungen begriffen sind, so können auch leicht durch langsame Verbrennung, Stoß, Wärme, elektrische Schläge und den Lebensproceß einzelne Moleküle zu höheren Schwingungszahlen erregt werden und dadurch eine geringe Lichtmenge ergeben; doch begegnet man hier noch manchem Räthsel. Aus schwacher Phosphorescenz wird wohl auch Reichenbachs Odlicht (?) bestehen.

3. Die Fortpflanzung des Lichtes.

282 **Die Lichtstrahlen.** Unter Lichtstrahlen versteht man die Linien, in welchen sich das Licht fortpflanzt. Das Licht pflanzt sich sowohl durch den Weltraum, wie auch durch Körper fort, weil der Aether überall verbreitet ist; die Körper, welche das Licht durchlassen, werden je nach der Menge des durchgehenden Lichtes durchsichtig, halbdurchsichtig, durchscheinend genannt; undurchsichtig heißen diejenigen, die kein Licht durchlassen. — *Die Lichtstrahlen gehen von einem leuchtenden Punkte nach allen Richtungen; die Lichtstrahlen sind in einem isotropen Medium gerade Linien.*

Der Beweis für diese zwei Sätze liegt darin, daß das Licht eine Wellenbewegung ist, und daß für eine Wellenbewegung in einem isotropen Medium diese zwei Sätze gelten (229.). Der Nachweis des ersten Satzes ist damit zu führen, daß ein leuchtender Punkt von allen Seiten sichtbar ist, der des zweiten Satzes durch die bekannte Thatsache, daß ein Lichtpunkt verschwindet, wenn in die gerade Linie zwischen dem Auge und dem Punkte ein undurchsichtiger Körper gebracht wird.

283 *Folgen der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes.* 1. Der Schatten ist diejenige Stelle an einem undurchsichtigen Körper, die kein Licht empfängt. Man unter-

scheidet Eigenschatten und Schattenraum; der Eigenschatten ist derjenige Theil des undurchsichtigen Körpers, der nicht beleuchtet ist; der Schattenraum ist der Raum hinter dem Körper, in den kein oder auch weniger Licht dringt, als in den übrigen Raum rings um den Körper. Den Schattenraum unterscheidet man in Kernschatten und Halbschatten, wenn die Lichtquelle kein Punkt, sondern ein Körper ist; der **Kernschatten** ist derjenige Raum, der von keinem Punkte des leuchtenden Körpers Licht erhält; der **Halbschatten** dagegen ist der Raum, der nur von einem Theile des leuchtenden Körpers beleuchtet ist. — Wenn die Lichtquelle ein Punkt ist, so ist der Schattenraum ein abgestumpfter Kegel oder eine abgestumpfte Pyramide, deren kleine Basis die Körpergrenze ist, deren anderes Ende sich aber allmälig verliert; ist die Lichtquelle von dem Körper sehr weit entfernt, wie die Sonne von den irdischen Körpern, so ist der Schattenraum prismatisch oder cylindrisch, und zwar mit einer Grundfläche, die durch die Körpergrenze bestimmt ist. Der auf eine Fläche fallende Schatten oder Schlagschatten ist der Durchschnitt derselben mit dem Schattencylinder oder Schattenkegel. — Ist die Lichtquelle kein Punkt, so ist die Form des Kernschattens bedingt durch die Form und Größe der Lichtquelle und des Körpers. Sind z. B. beide kugelförmig, und ist die Lichtquelle größer als der Körper, wie bei der Sonne und ihren Planeten und Trabanten, so hat der Kernschatten die Form eines Kegels, dessen Oberflächen-Verlängerung die beiden Körper berührt (Fig. 149); der Halbschatten ist ein abgestumpfter Kegel, dessen Seitenlinien beide Körper berühren, dessen kleinere Basis der Schattenkörper ist, und der sich nach der Richtung der größeren Basis hin allmälig verliert. Da der Schnitt eines Kegels senkrecht zu seiner Achse kreisförmig ist, so bildet der Schlagschatten, wenn er auf eine solche senkrechte Fläche fällt, einen nach außen immer heller werdenden, halbdunkeln Kreis, der einen ganz dunkeln Kreis einschließt, wenn auch der Kernschatten noch auf die Fläche fällt. Nach den Lehren der Geometrie sind die Dimensionen der Schatten leicht zu berechnen. Eine besonders wichtige Anwendung finden die Sätze über Schatten bei den Sonnen- und Mondfinsternissen, s. 578. Bei einer Mondfinsterniß tritt der Vollmond in den sehr mächtigen Schatten der Erde, und bei einer Sonnenfinsterniß versperrt uns der Neumond den Anblick der Sonne und wirft seinen Schatten auf die Erde; diejenigen Punkte der Erde, über welche der Kernschatten des Mondes hingeht, haben totale Sonnenfinsterniß; dagegen diejenigen Erdpunkte, welche nur von dem Halbschatten des Mondes getroffen werden, partiale Sonnenfinsterniß; eine ringförmige Sonnenfinsterniß wird an den Erdpunkten gesehen, welche in die Verlängerung des Kernschattens des Mondes fallen. Näheres in der Physik des Himmels.

Fig. 149.

2. **Die optische Kammer** (Leonardo da Vinci 1500). **Dringen durch eine Wandöffnung in einen dunkeln Raum Lichtstrahlen, so entstehen auf der gegenüberliegenden Wand umgekehrte Bilder der Gegenstände, von denen die Lichtstrahlen kommen.** Von jedem Punkte dieser Gegenstände gehen nämlich, wenn dieselben sichtbar, also beleuchtet sind, Lichtstrahlen nach allen Richtungen, also auch durch die Oeffnung; von einem physischen Punkte geht ein ganzes Strahlenbündel aus, das sehr zahlreiche Strahlen enthält, wenn der Punkt hell ist, nur wenige Strahlen, wenn er schwach beleuchtet ist; ist der physische Punkt dunkel, so enthält das in Gedanken durch die Oeffnung gezogene Strahlenbündel gar keine Strahlen. Nun ist aber die Lage der Geraden, die durch einen Punkt gehen, nach dem Schnitte gerade die umgekehrte als vorher; folglich müssen in dem dunkeln Raume die durch die Oeffnung eingedrungenen Strahlenbündel die entgegengesetzte Lage haben als außerhalb. Das reiche Strahlenbündel erzeugt nun auf der gegenüberliegenden Wand eine helle Stelle, das arme eine schwach beleuchtete Stelle, das gedachte dunkle läßt die betreffende Wandstelle dunkel; folglich entsteht auf der Wand genau derselbe Wechsel zwischen hell, halbhell und dunkel, wie auf den Gegenständen selbst, nur in umgekehrter Lage; es entsteht ein verkehrtes Bild. Das Bild ist um so größer, je kleiner die Entfernung der Gegenstände und je größer die Entfernung der Bild-

fläche von der Oeffnung ist; es ist um so deutlicher, je kleiner die Oeffnung ist; aber in gleichem Maße nimmt dann auch die Helligkeit ab, wodurch die Deutlichkeit wieder vermindert wird. Eine zu große Oeffnung verwischt das Bild völlig, weil eine solche als aus vielen kleinen zusammengesetzt angesehen werden kann, wodurch an jeder Stelle der Bildfläche mehrere Bilder verschiedener Stellen entstehen, die sich gegenseitig verwischen. Eine ganze Fensteröffnung erzeugt daher kein Bild auf der gegenüberliegenden Zimmerwand, sondern nur einen allgemeinen Eindruck der größeren oder geringeren Helligkeit der äußeren Dinge. Dagegen feine Löcher in geschlossenen Fensterläden oder die feinen Oeffnungen zwischen den Blättern einer Laube geben kreisförmige oder elliptische Sonnenbilder, wenn sie selbst auch die verschiedenste Gestalt besitzen; bei einer partialen Sonnenfinsterniß entstehen sichelförmige Sonnenbilder. Hat man eine mit mattem Glase verschlossene Pappröhre, die in einer zweiten, eine kleine Oeffnung im Boden besitzenden Röhre verschiebbar ist, so sieht man in derselben auf der Glastafel Bilder der Gegenstände; sie ist also eine optische Kammer im Kleinen.

3. **Die Perspective.** Denkt man sich von den einzelnen Eckpunkten eines Gegenstandes Geraden ins Auge gezogen und die einzelnen Punkte, in welchen diese Geraden eine verticale zwischen dem Auge und dem Gegenstande aufgestellte Bildebene treffen, durch eben solche Linien verbunden, wie sie an den Körpern selbst vorhanden sind, und denkt man sich die einzelnen Figuren, die auf der Bildebene dadurch entstehen, in gleicher Weise wie auf dem Gegenstande mit Licht, Schatten und Farben versehen, so muß das entstehende Bild im Auge denselben Eindruck hervorbringen wie der Gegenstand. Man nennt es die Perspective oder das perspectivische Bild des Gegenstandes. Die Lehre von der Perspective ist die Grundlage der Zeichenkunst und Malerei.

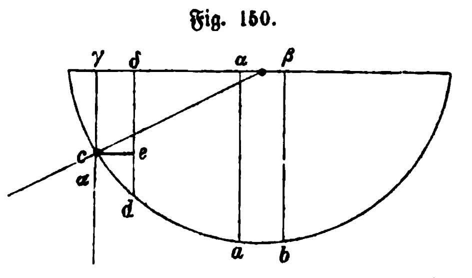
4. **Das Fixiren von geraden Linien in der Meßkunst.** Um von einem Punkte auf dem Felde aus eine gerade Linie abzustecken, stellt man einen Stab an dem Punkte auf und läßt nun andere Stäbe so stellen, daß sie von dem ersten Stabe für das Auge gedeckt erscheinen; genauer verfährt man mit dem Diopterlineal oder mit dem Fernrohre mit Fadenkreuz. Das erste besteht aus einem wagrechten Lineal, das an beiden Enden senkrechte Arme trägt; der eine Arm enthält einen verticalen Spalt, der andere eine große Oeffnung mit einem verticalen Pferdehaare. Das Auge findet sich in gerader Linie mit dem Haare und einem Gegenstande, wenn diese sich decken. Das Fadenkreuz in einem Fernrohre besteht aus einem wagrechten und einem lothrechten Spinnenfaden, die sich in der Achse des Rohres kreuzen; die Gerade ist fixirt, wenn Fadenkreuz und Gegenstand sich decken.

284 **Die Intensität des Lichtes.** Die Stärke der Lichtwirkung einer Lichtquelle oder die Intensität des Lichtes an irgend einer Stelle hängt ab: 1. Von der Entstehungsstärke des Lichtes; sie ist derselben direct proportional. 2. Von der Entfernung von der Lichtquelle; die Intensität des Lichtes ist umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. 3. Von dem Medium, durch welches sich das Licht fortgepflanzt hat; die Intensität ist um so geringer, je stärker die Absorption des Mediums ist. Fällt das Licht auf eine Fläche, so ist die Stärke der Erleuchtung auch noch abhängig: 4. Von dem Winkel, den der Lichtstrahl mit der Fläche bildet; die Stärke der Erleuchtung ist proportional dem Sinus des Neigungswinkels der Lichtstrahlen gegen die Fläche. 5. Von der Reflexionsfähigkeit dieser Fläche; reflectirt die Fläche nicht, so ist sie nicht erleuchtet; reflectirt sie alles auffallende Licht, so ist sie stark erleuchtet; reflectirt sie nur einen Theil oder nur einige Farbenbestandtheile des Lichtes, so ist sie schwächer erleuchtet. 6. Von dem Winkel, unter dem die Lichtstrahlen die leuchtende Fläche verlassen; die Beleuchtung ist proportional dem Cosinus des Ausgangswinkels.

1. Die Stärke einer Lichtquelle hängt von der Natur derselben und von der Höhe der Gluth ab, zu welcher der glühende Körper oder die in einer Flamme glühenden Theilchen gebracht werden; denn mit der wachsenden Temperatur wächst nicht blos die Schwingungszahl eines Theiles der Moleküle, sondern auch die Amplitude eines anderen Theiles derselben; am stärksten ist das Licht bei der Weißgluth. Doch ist die Lichtwirkung der Schwingungszahl durchaus nicht proportional; denn das Maximum der Lichtwirkung wird nicht von den violetten, sondern von den gelben Strahlen hervorgebracht; diese müssen also entweder die größte Amplitude haben, oder das Auge muß für dieselben am empfindlichsten sein. — 2. Daß die Intensität des Lichtes im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung steht, folgt aus dem Wesen des Lichtes als einer Wellenbewegung, für welche der Satz allgemein in 229. bewiesen wurde. Doch ist er auch leicht geometrisch zu

beweisen: denkt man sich die Spitze einer Pyramide als Lichtquelle und das Licht im Inneren der Pyramide fortschreitend, so trifft es nach einem Lehrsatze der Geometrie in doppelter Entf. auf eine 4mal so große, in 3facher Entfernung auf eine 9mal so große, . . . in nfacher Entf. auf eine n^2 mal so große Fläche; folglich empfängt das gleiche Flächenstück eine n^2 mal kleinere Lichtmenge. — Nachweisen kann man diesen wichtigen Satz mit irgend einem, z. B. Ritchies Photometer (1825); dasselbe besteht aus einem geschwärzten Kasten, in dessen Mitte zwei ganz gleiche Spiegel unter Winkeln von 45° gegen den Horizont an einander gelehnt sind; über denselben ist der Kasten durchbrochen und ein dunkles Rohr aufgesetzt, durch welches man auf die Spiegel sehen kann. Stellt man nun in irgend einer Entfernung von dem einen offenen Ende ein Wachslicht auf, so muß man in doppelter Entf. von dem anderen offenen Ende 4 gleiche Lichter aufstellen, damit die 2 Spiegel gleich stark beleuchtet sind. — 3. Die Absorption des Lichtes, d. i. die Aufzehrung des Lichtes durch das Medium, wird später betrachtet. — 4. Läßt man ein Lichtbündel, dessen Dicke gleich der Kathete eines rechtwinkligen Dreiecks ist, senkrecht auf diese fallen und dann weiter gehen, so trifft dasselbe die ganze Hypotenuse und vertheilt sich auf diese größere Linie; daher empfangen gleiche Stücke der Hypotenuse weniger Licht als gleiche Stücke der Kathete, und zwar in dem Verhältnisse weniger, als die Kathete kleiner ist wie die Hypotenuse; dieses Verhältniß ist aber durch den Sinus des Gegenwinkels der Kathete, d. i. des Neigungswinkels der Strahlen gegen die Hypotenuse ausgedrückt; die Erleuchtungsstärke ist also dem Sinus des Neigungswinkels proportional. Auch dieser Satz läßt sich mit Ritchies Photometer nachweisen, wenn die Spiegel verstellbar sind. Dreht man eine weiße Fläche gegen ein Lampenlicht in verschiedene Neigungen, so sieht man leicht die Ab- und Zunahme der Erleuchtung. Der Nachweis läßt sich auch mit Bunsens Photometer führen, wenn der Schirm desselben um eine Achse drehbar ist. Sorgt man dafür, daß das hinter dem Schirme angebrachte Licht immer in der Höhe des Fleckens und in der zur Schirmebene senkrecht durch den Flecken gehenden Richtung bleibt, während man den Schirm dreht, und ist der Flecken vor der Drehung unsichtbar, so tritt derselbe bei der Drehung wieder hell auf dunkelm Grunde hervor (285.). — 5. Die Verhältnisse der Reflexion werden später betrachtet werden. — 6. Der Beweis des Satzes ist leicht an Fig. 150 zu führen. Eine kugelförmige Lichtquelle erscheint uns als gleichmäßig beleuchtete Scheibe, also empfängt das Auge gleiche Lichtbündel $\alpha\beta$ab, $\gamma\delta$cd u. s. w. Nun treten aber aus cd mehr Lichtstrahlen als aus ab, und zwar in dem Verhältnisse mehr, als cd größer ist als ab, d. i. in dem Verhältnisse $cd : ce = 1 : \cos\alpha$; folglich müssen bei dem schiefen Austritte die Strahlen in dem Verhältnisse $\cos\alpha : 1$ geschwächt werden, die Beleuchtungsstärke ist also proportional zu $\cos\alpha$, d. i. zu dem Cosinus des Ausgangswinkels.

Fig. 150.



Die Photometrie. Die Photometer (φῶς, Licht) sind Apparate zur vergleichenden Messung der Lichtstärke. Sie gründen sich meist auf den Satz von dem umgekehrten Verhältnisse der Intensität einer Lichtquelle zu dem Quadrat der Entfernung. Die hauptsächlichsten sind: 1. Das Schattenphotometer von Lambert (1760); 2. das Spiegelphotometer von Ritchie (s. 284.); das Fettfleckenphotometer von Bunsen (1857); weniger geeignet zu allgemeiner Anwendung erscheinen Weathstones Stahlkugelphotometer, Doves mikroskopisches Photographiephotometer, Wilds Polarisationsphotometer. Bei den gewöhnlichen photometrischen Untersuchungen von Flammen wird die Leuchtkraft einer 6pfündigen Wachskerze (6 auf ein Pfd.) zu Grunde gelegt; die zu untersuchende Flamme wird in eine solche Entfernung von dem Photometer gebracht, daß sie auf dasselbe genau denselben Eindruck macht wie die Normalkerze; die Lichtstärke der betreffenden Flamme verhält sich dann zu derjenigen der Normalkerze direct wie die Quadrate der Entfernungen. 285

Das Lambert'sche Photometer besteht aus einem vor einer Tafel stehenden Stabe, der auf die Tafel Schatten der zu vergleichenden Lichtquellen wirft; der Schatten vom stärkeren

Lichte wird nur durch das schwächere Licht beleuchtet und der Schatten vom schwächeren Lichte durch das stärkere; folglich wird der erste Schatten dunkler sein als der letzte. Rückt man aber die stärkere Lichtquelle weiter von der Tafel weg und zwar so lange, bis die beiden Schatten gleich stark sind, so sind auch die Wirkungen der beiden Lichtquellen gleich. — Bunsens Photometer besteht aus einer Papiertafel, die einen Fettflecken enthält. Der Fettflecken läßt mehr Licht durch als das reine Papier; folglich muß auf der Seite der größeren Lichtstärke der Flecken dunkler als das Papier, auf der Seite der kleineren Lichtstärke aber der Flecken heller als das Papier erscheinen. Wenn dagegen beiderseits die Lichtstärke gleich groß ist, so kommt von der zweiten Seite gerade soviel Licht durch den Flecken auf die erste, als von der ersten nach der zweiten hinübergegangen ist; folglich wird der Lichtverlust des Fleckens ersetzt; der Flecken erscheint so hell wie das Papier. Um also mittels Bunsens Photometer eine Flamme mit der Normalkerze zu vergleichen, rückt man sie, während die Normalkerze auf der einen Seite brennt, auf der anderen Seite so lange hin und her, bis der Flecken von dem Papier nicht mehr zu unterscheiden ist; die Lichtstärken verhalten sich dann wie die Quadrate der Entfernungen. Bei diesem Gedankengange ist die Absorption des Lichtes durch das Papier außer Acht gelassen, was bei sehr genauen Messungen nicht geschehen darf, weil nach Bohn der Flecken mehr Licht absorbirt als das Papier. Dies hat zur Folge, daß bei beiderseits gleicher Entfernung zweier ganz gleichen Lichter der Flecken dunkler erscheint als das Papier. Wir finden die Erklärung hierfür am einfachsten, wenn wir annehmen, daß das Papier gar nicht und der Flecken ein wenig absorbire. Betrachten wir die Scheibe von einer Seite, so empfängt das Auge das von der anderen Seite herübergekommene und das auf dieser Seite reflectirte Licht. Während nun durch das Papier gerade so viel herüberkommt als hinübergegangen ist, kommt durch den Flecken wegen der Absorption etwas weniger Licht herüber als hinüber gegangen ist; ebenso wirft das Papier den nicht durchgelassenen Rest vollständig zurück, der Flecken aber wirft wegen der Absorption etwas weniger zurück; folglich muß der Flecken dunkler erscheinen als das Papier. Das Licht auf der Seite des Beschauers muß daher etwas näher an die Scheibe gerückt werden als das jenseitige Licht, damit der Flecken dem Papier gleich erscheine. Ist dies geschehen, so nimmt man dieses Licht hinweg und bringt nun die zu prüfende Flamme in eine solche Entfernung von der Tafel, daß ebenfalls jene Gleichheit stattfinde; dann läßt sich mit aller Genauigkeit sagen, daß die Stärke der Flamme zu der der weggenommenen Normalkerze sich verhalte, wie das Quadrat ihrer Entfernung zu dem Quadrat des letzten Abstandes der Normalkerze.

Rüdorff (1874) hat gezeigt, daß man trotz der Absorption das Bunsen'sche Photometer auch ohne Hilfskerze benutzen könne, da sich leicht folgende zwei Sätze beweisen lassen: 1. Die Intensität ist links und rechts gleich groß, wenn der Flecken beiderseits gleich viel dunkler als das Papier erscheint. 2. Die Entfernung, in welcher das fragliche Licht und die Normalkerze gleiche Intensität haben, ist (die Entfernung der letzteren $= 1$ gesetzt) das geometrische Mittel zwischen den zwei Entfernungen, in welchen der Flecken rechts und links verschwindet.

Beweis zu 1. Es seien aI, bI, cI bezüglich das vom Papier reflectirte, durchgelassene und absorbirte Licht der Normalflamme rechts, und αI, βI, γI dieselben Bezeichnungen für den Flecken, so ist $a + b + c = \alpha + \beta + \gamma$, worin $a > \alpha$ und $b < \beta$. Steht nun auf der anderen Seite in der Entfernung x das Licht mit der Intensität i, so ist die Intensität an dem Papierschirme $m = i : x^2$, und es gelten dann für dieses Licht die analogen Bezeichnungen am, bm, cm, αm, βm, γm. Rechts vom Papier geht aus das Licht $aI + bm$, rechts vom Flecken $\alpha I + \beta m$, links vom Papier $bI + am$, links vom Flecken $\beta I + \alpha m$; das absorbirte Licht im Papier ist $c(I + m)$, im Flecken $\gamma(I + m)$. Wenn nun der Flecken beiderseits gleich dunkel erscheint, so ist $aI + bm = bI + am$ und $\alpha I + \beta m = \beta I + \alpha m$ oder $(a - b) I = (a - b) m$ und $(\alpha - \beta) I = (\alpha - \beta) m$, woraus $I = m$, womit 1. bewiesen ist. Mit 2 hinter dem Schirme angebrachten schiefen Spiegeln läßt sich leicht beobachten, ob die beiden Fleckenseiten gleich dunkel erscheinen; ist dies erreicht, so ist $i = x^2 . I$.

Beweis zu 2. Wenn der Flecken rechts bei der Entfernung x_1 und der Lichtintensität m_1 verschwindet, so ist $aI + bm_1 = \alpha I + \beta m_1$, woraus $(a - \alpha) I = (\beta - b) m_1 = (\beta - b)(i : x_1^2)$ und $x_1 = \sqrt{(\beta - b)(i : I) : (a - \alpha)}$. Verschwindet der Flecken links, so ist ebenso $x_2 = \sqrt{(a - \alpha)(i : I) : (\beta - b)}$. Multiplication ergibt $x_1 x_2 = i : I = x^2$, womit 2. bewiesen ist. Das Verschwinden des Fleckens ist nach den Erfahrungen von Rüdorff weniger scharf zu beobachten, weßhalb die aus 1. hervorgehende Methode mehr zu empfehlen ist.

286 **Die Geschwindigkeit des Lichtes.** Da die Geschwindigkeit einer Wellenbewegung nach Fl. (30) $c = \sqrt{(e : d)}$ nur von der Elasticität und Dichte des Mediums

abhängt, nicht aber von der Zahl und Weite der Schwingungen, so ist auch die Geschwindigkeit des Lichtes unabhängig von der Farbe und von der Intensität des Lichtes, wie überhaupt von der Beschaffenheit der Lichtquelle, was durch Versuche bestätigt wird. Berechnen läßt sich die Geschwindigkeit aus Fl. (30) nicht, weil uns die Elasticität und Dichte des Aethers unbekannt sind. Man hat daher die Geschwindigkeit des Lichtes durch Beobachtungen und Versuche aufzufinden gesucht und im Mittel zu 40000 Meilen bestimmt. Die Methoden waren folgende: 1. Durch die Verfinsterung der Jupitertrabanten, von Olaf Römer 1676; 2. Durch die Aberration des Fixsternlichtes, von Bradley 1727; 3. Die Methode mit zwei Fernrohren und einem Zahnrade, von Fizeau 1849; 4. Die Methode mit sieben Spiegeln und einem Mikroskop, von Foucault 1862.

1. Der erste Jupitertrabant, der eine Umlaufzeit von 42 St. 28′ 35″ hat, kommt bei jedem Umlaufe in den Schatten des Jupiter, hat also bei jedem Umlaufe eine Finsterniß zu bestehen. Aus dieser Finsterniß tritt er immer nach der angegebenen Zeit heraus, wenn die Erde in solchen Gegenden ihrer Bahn sich bewegt, welche auf der Verbindungslinie nach dem Jupiter hin senkrecht stehen, in welchen sich also die Erde dem Jupiter weder nähert, noch sich von ihm entfernt. Dagegen tritt der Trabant immer etwas später aus der Finsterniß, wenn die Erde sich von dem Jupiter entfernt, weil das neu auftauchende Licht in diesem Falle der Erde um den Weg nachlaufen muß, den sie in der Zwischenzeit zurückgelegt hat; ebenso tritt der Trabant scheinbar etwas früher aus der Finsterniß, wenn sich die Erde dem Jupiter nähert, weil sie jetzt dem Lichte entgegengeht und dieses daher früher auf ihr anlangt. Alle in einem halben Jahre stattfindenden Verspätungen auf der einen Seite der Bahn betragen zusammen 16. Min. 26,38 Sec., ebenso alle verfrühten Zeiten auf der anderen Seite der Bahn zusammen; in dieser Zeit hat sich die Erde von dem Jupiter um ihren ganzen Bahndurchmesser entfernt, resp. genähert; folglich legt das Licht in jenen 986,38 Sec. den Durchmesser der Erdbahn = 40 M. M. zurück, woraus die Geschw. des Lichtes = 40 000 Meilen. — 2. Wenn eine Kugel, die von einer auf die Richtung eines ruhig liegenden Schiffes senkrecht gerichteten Kanone abgeschossen wird, durch das Schiff eine Röhre bohrt, so muß diese Röhre senkrecht zur Längsrichtung des Schiffes sein; geht aber die Kugel durch ein fahrendes Schiff, so wird die gebohrte Röhre von der Senkrechten abweichen und zwar nach der Richtung hin, von welcher das Schiff kommt. Der Winkel, den diese schiefe Röhre mit der senkrechten bilden würde, wäre offenbar unabhängig von der Entfernung der Kanone, dagegen abhängig von der Geschwindigkeit des Schiffes und der Kanonenkugel, und zwar wäre die trigonometrische Tangente dieses Winkels gleich der Geschwindigkeit des Schiffes dividirt durch die Geschw. der Kugel. Ebenso würde ein von einem Sterne kommender Lichtstrahl unverändert in seiner eigenen Richtung durch das Auge gehen, wenn die Erde in Ruhe wäre, und wir würden daher, da wir einen Körper immer in der Richtung sehen, in welcher sein Strahl die Hinterwand unseres Auges trifft, den Stern in seiner wahren Lage erblicken. Nun bewegt sich aber die Erde, während der Strahl von der Vorderwand des Auges zur Hinterwand fortschreitet, wie das Schiff im zweiten Falle weiter; der Strahl wird daher die Hinterwand nicht an derselben Stelle treffen, wie auf einer ruhenden Erde, sondern auf einer Stelle abseits nach der Richtung hin, von welcher die Erde kommt. Der Strahl geht daher nicht in seiner eigenen Richtung durch das Auge, sondern erscheint etwas abgelenkt, und zwar um einen Winkel, dessen trigonometrische Tangente $\tang \alpha = c : v$, wo c die Geschw. der Erde = 4 M. und v die unbekannte Geschw. des Lichtes bedeutet. Um diesen Winkel erscheint uns, da wir den Stern immer in der Richtung erblicken, in welcher der Strahl die Hinterwand unseres Auges trifft, jeder Stern immer von seiner wirklichen Lage abgelenkt, eine Erscheinung, die man die Aberration des Lichtes nennt. Am Ende eines halben Jahres geht die Ablenkung genau nach der entgegengesetzten Richtung wie am Anfange desselben; die jährliche Aberration von 40,5″, die schon lange bekannt ist, beträgt daher die doppelte Ablenkung; folglich ist in unserer Formel außer c auch $\alpha = 20{,}25''$ bekannt, so daß man v daraus finden kann; $v = c : \tang \alpha = 4 : 0{,}0001 = 40\,000$ M. — 3. Fizeau ließ durch einen schief in einem Fernrohre befestigten Spiegel ein seitlich hereinkommendes Lichtbündel in die Achse des Fernrohres reflectiren, wo dasselbe durch die Lücke eines Zahnrades hinausging und sich zu einem 8633^{m} entfernten Fernrohre fortpflanzte und, von einem Spiegel in demselben reflectirt, wieder durch die Zahnlücke zurückkehrte und in das am hinteren Ende des ersten Rohres befindliche Auge gelangte. Das Auge erblickte so den Lichtpunkt, von dem das Strahlenbündel ausging; dasselbe fand statt, wenn man das Rad langsam drehte, weil der Strahl eher zurück war, als ein Zahn an die Stelle der

Lücke gelangte; drehte man aber das Rad nach und nach rascher und zwar so rasch, daß die Zeit eines Hin- und Herganges genau der Zeit gleich war, in welcher ein Zahn an die Stelle der vorausgehenden Lücke trat, so mußte der Lichtpunkt verschwinden. Dies geschah durch ein Rad mit 720 Zähnen und 720 Lücken bei 12,6 Umläufen in der Secunde; also war diese Zeit = 1 : (1440 . 12,6) = $^1/_{18144}$ Sec., während welcher Dauer das Licht 2 . 8633^m zurücklegte; daher ist die Geschwindigkeit des Lichtes = 17266 . 18144^m = 42200 Meilen. In ähnlicher Weise fand Fizeau die Geschw. in Wasser = $^3/_4$ von der Geschw. in der Luft. — 4. Foucault ließ Sonnenlicht von einem, mit Strichen von 0,1^{mm} Entf. versehenen, Silberspiegel reflectiren, ließ alsdann das Strahlenbündel über einen drehbaren ebenen und fünf Hohlspiegel durch Reflexion hin- und zurückgehen. War der drehbare Spiegel in Ruhe, so fiel das Bild der Silberstriche auf diese selbst; durch ein Mikroskop erschienen daher die Silberstriche unverändert in ihrer früheren Zahl und Lage. Wurde aber der drehbare Spiegel so schnell gedreht, daß er bei der Rückkehr des Strahlenbündels von den fünf Hohlspiegeln eine andere Richtung hatte als bei dem Hingange desselben, so mußte nothwendig das Bild der Silberstriche auf dem Silberspiegel an einer anderen Stelle als diese selbst erscheinen. Aus dem Abstande des Bildes von den Strichen selbst, sowie aus der Größe der Drehung des drehbaren Spiegels findet man die Zeit für den Hin- und Rückweg des Lichtes über die 5 Hohlspiegel, dessen Länge leicht durch den Abstand der Spiegel gegeben ist. Foucault fand hieraus die Geschw. des Lichtes = 40145 M., also kleiner als 42000 M., wie man früher nach allen 3 obigen Methoden gefunden hatte. Früher nahm man nämlich die Entfernung der Erde von der Sonne zu 21 M. M. an; in der ersten Methode mußte daher an Stelle von 40 M. M. 42 M. M. stehen und in der zweiten Methode 4,19 M. an der Stelle von 4 M.; daher ergaben auch jene Methoden für v = 42000 M. Eine ganze Reihe astronomischer Thatsachen (563.) hatte aber schon seit etwa 10 J. darauf hingewiesen, daß 21 M. M. nicht ganz richtig sei und ca 20 M. M. dafür gesetzt werden müsse; diese Hindeutungen wurden durch die Beobachtungen des Venusdurchganges vom 8. Dez. 1874 bestätigt und dadurch die Geschw. des Lichtes auf 40000 M. festgestellt, womit auch das Resultat von Foucault stimmt, während das von Fizeau sich mehr der alten Zahl nähert. Nun hat aber Cornu seit längerer Zeit zahlreiche Beobachtungen angestellt nach der Methode von Fizeau, jedoch so vervollkommnet, daß derselbe einen Fehler von höchstens $^1/_{400}$ verbürgen zu können glaubt, und hat nach dieser Methode 40000 M. gefunden. Die Unabhängigkeit der Geschwindigkeit von der Amplitude und der Schwingungszahl, also von der lebendigen Kraft ist bekanntlich unter der Voraussetzung gefunden, daß die ein Theilchen zurücktreibende Kraft der ersten Potenz des Abstandes proportional sei; ist diese Voraussetzung nicht genau, so ist auch die Folgerung nicht ganz richtig; der leider zu früh verstorbene J. J. Müller hat (1872) gefunden, daß bei der Berücksichtigung von Milliontheilchen die Geschwindigkeit des Lichtes mit seiner Helligkeit, die Wellenlänge also mit der Amplitude wächst.

287 Aufg. 448. Wenn die Schwingungszahl der langsamsten violetten Strahlen 755 und die der schnellsten rothen Strahlen 452 Bill. beträgt, welches ist dann die Wellenlänge dieser Strahlen? Aufl.: 0,0003928^{mm}, 0,0006564^{mm}. — A. 449. Wenn die Wellenlänge der dunkelsten Wärmestrahlen 0,0048^{mm} und die der äußersten ultravioletten Strahlen 0,0003^{mm} wäre, welches wären dann die Schwingungszahlen dieser Strahlen und wieviel Octaven würden die Aetherschwingungen enthalten? Aufl.: 62 Bill., 989 Bill., 4 Oct. — A. 450. Wie müßten sich die gelben Schwingungen von den rothen und von den violetten unterscheiden, wenn sie eine 2-, resp. 3mal größere Lichtstärke hätten als bezüglich jene beiden? Aufl.: Durch eine $\sqrt{2}$, bez. $\sqrt{3}$ mal größere Amplitude. — A. 451. Eine vergleichende Tabelle über das Wesen von Schall und Licht aufzustellen; einen Anhalt zur Lösung bietet 279. — A. 452. Die Lichtstärke von α Centauri mit der des Sirius zu vergleichen? Aufl.: Nach den in 280. angegebenen Zahlen 20000 : 16000 = 5 : 4. — A. 453. Wenn die Venus im höchsten Glanze 623 Mill. mal schwächer als die Sonne leuchtet, wie verhält sie sich dann zum Jupiterglanze, der nach denselben (amerikanischen) Angaben 3028 Mill. mal schwächer als die Sonne ist? Aufl.: 5 : 1. — A. 454. Wie findet man den Schlagschatten eines Punktes, einer Linie, einer Fläche, eines Körpers auf einer Ebene, wenn die Lichtquelle ein naher Punkt, und wenn sie unendlich fern ist? Aufl. für den Punkt: Man zieht durch den Punkt einen Lichtstrahl und bestimmt den Punkt, wo dieser die Ebene schneidet; dieser Punkt ist der Schatten. — A. 455. Wie hoch ist ein Thurm, dessen Schatten 40^m lang ist, wenn ein daneben stehender Stab von 1^m Höhe einen Schatten von 60^{cm} Länge wirft? Aufl.: 66$^2/_3$^{m}. — A. 456. Wie lang ist der Schatten eines 100^m hohen Thurmes, wenn die Sonne 45° über dem Horizont steht? Aufl.: 100 : tang 45° = 100^m. — A. 457. Wie hoch ist ein Thurm, der bei einer Sonnenhöhe von 30° einen Schatten von 50^m Länge wirft? Aufl.: 28,83^m. — A. 458. Wie lang ist der Schatten eines h^m hohen Thurmes am 21. März um Mittag in Mainz?

Aufl.: $h \cotg (90-50) = h \cotg 40^0$. — A. 459. Wie hoch ist ein Stab, der am 21. Juni in Mainz einen Mittagsschatten von der Länge s wirft? Aufl.: $s . \tang 63^1/_2$. — A. 460. Wie lang ist der Schattenkegel einer Kugel vom Radius r durch eine Sonne vom Radius R, wenn die Entf. der Mittelpunkte s beträgt? Aufl.: $rs : (R-r)$. — A. 461. Wie lang sind die Schattenkegel der Erde und des Mondes? Aufl.: 180 000, 50 000 M. — A. 462. Wie groß ist der Halbmesser des Schattenkegels (A. 460) in der Entf. e? Aufl. $r-e(R-r):s$. — A. 463. Wie groß ist die Dicke des Erdschattens, wo der Mond durch denselben geht? Aufl.: 1240 M. — A. 464. Wie groß ist der Halbmesser des Halbschattens in A. 462? Aufl.: $[rs + e(R+r)] : \sqrt{[s^2 - (R+r)^2]}$. — A. 465. Wie groß erscheint ein Sonnenbild in der optischen Kammer auf einer 1^m entfernten Tafel durch eine Oeffnung von 1^{cm} Durchm.? Aufl.: Die Sonne erscheint uns unter einem Winkel von 32′; daher der Durchmesser des Sonnenbildes $1 + 2 . 100 . \tang 16' = 1{,}93^{cm}$. — A. 466. Dieselbe Aufg. allgemein, wenn d der Durchm. der Oeffnung und s die Entf. der Tafel ist? Aufl.: $d' = d + 2s \tang 16'$. — A. 467. Wie groß muß die Entfernung der Tafel sein, damit das Sonnenbild n mal so groß als die Oeffnung werde? Auflösung: $s = {}^d/_2 (n-1) \cotg 16'$. — A. 468. Wie mißt man auf dem Felde gerade Linien? Aufl.: Durch Meßketten oder Meßstäbe mit zwei Visirstangen; Erklärung. — A. 469. Wie errichtet man auf dem Felde Senkrechte? Aufl.: Durch 2 in rechtem Winkel sich kreuzende Diopter (Kreuzscheibe); Erklärung. — A. 470. Wenn die Stärke der Erleuchtung einer Flächeneinheit in der Entf. 1 durch 1 Normalkerze unter rechtem Winkel der Strahlen = 1 gesetzt wird, wie groß ist dann die Erleuchtung durch n Kerzen in der Entf. s und unter dem Winkel α? Aufl.: $i = n \sin \alpha : s^2$. — A. 471. Ueber einer Ebene findet sich in der Entf. s eine Normalkerze; wie stark wird ein um d vom Fußpunkte des Lothes entferntes Flächentheilchen f der Ebene beleuchtet? Aufl.: $fs : \sqrt{(s^2 + d^2)^3}$. — A. 472. Eine Steinöllampe, eine Argand'sche Oellampe und eine Uhrlampe mußten bez. 23^{cm}, 18^{cm}, 36^{cm} von der Bunsen'schen Scheibe entfernt sein, um wie eine Normalkerze in 8^{cm} Entf. zu wirken; welches waren die Lichtstärken? Aufl.: $8^1/_3$, $5^1/_8$, 17. — A. 473. Wieviel Zeit gebraucht das Licht, um vom Monde, von der Sonne, vom Neptun (800 M. M) zu uns zu kommen? Aufl.: $1^1/_5$ Sec.; 8 Min. 20 Sec.; 4 St. c^a. — A. 474. Wie weit ist die Alkyone von uns entfernt, wenn das Licht 573 Jahre bis zu uns braucht? Aufl.: c^a 759 Bill. M. — A. 475. Erscheinungen aus dem gewöhnlichen Leben, welche die verschiedene Geschw. von Licht und Schall zeigen? Aufl.: Entferntes Klopfen, Geschützblitz und Knall, Blitz und Donner u. s. w. — A. 476. Ein jüngst erschienenes Büchlein, „die Geschwindigkeit des Lichtes in der Weltgeschichte" behauptet, daß man die historischen Ereignisse jetzt noch sehen könnte; wie weit müßte man sich entfernen, um dem trojanischen Kriege (3000 Jahre) zuschauen zu können? Aufl.: 40 000 . 60 . 60 . 24 . 365 . 3000 = 3784 Bill. M. — A. 477. Was ist gegen diese Aufstellung einzuwenden? Absorption oder Extinction des Lichtes, allzu kleiner Gesichtswinkel, unmögliche Fernrohre. — A. 478. Wie müssen 2 Ebenen stehen, um gleiche Beleuchtung von der Sonne zu erhalten? Aufl.: Parallel neben einander, parallel hinter einander, oder so geneigt, daß eine Verbindungslinie der Sonne mit der Kante ihren Winkel halbirt; Erklärung. —

4. Die Lehre von der Reflexion des Lichtes.

Die Katoptrik.

288 Wenn die Aetherwellen des Lichtes an der Oberfläche eines neuen Mediums anlangen, so können dieselben ein dreifaches Schicksal haben: 1. Sie können in das frühere Medium zurückkehren oder reflectirt werden; 2. sie können als Aetherwellen in das neue Medium eindringen und sich als solche in demselben und durch dasselbe fortpflanzen, sie werden durchgelassen; 3. sie können in dem neuen Medium als Aetherwellen vernichtet werden, weil sie ihre Bewegung an die Körpermoleküle abgeben und so, indem die Schwingungszahl sich erniedrigt, in dunkle Wärme verwandelt werden; man sagt dann, die Lichtstrahlen seien absorbirt worden. Häufig treten die drei Erscheinungen mit einander auf, meistens sind wenigstens zwei verbunden, selten oder nie wohl geschieht eine für sich. Indessen müssen dieselben getrennt dem Studium unterzogen werden. Wir betrachten zuerst die Reflexion und zwar die Reflexion an einem Flächen-Element, weil ein solches an

jeder Oberfläche, sei sie glatt oder rauh, gerade oder krumm, als eben vorausgesetzt werden darf, und weil wir die Reflexion einer Wellenbewegung an einer ebenen Fläche schon 231. kennen gelernt haben.

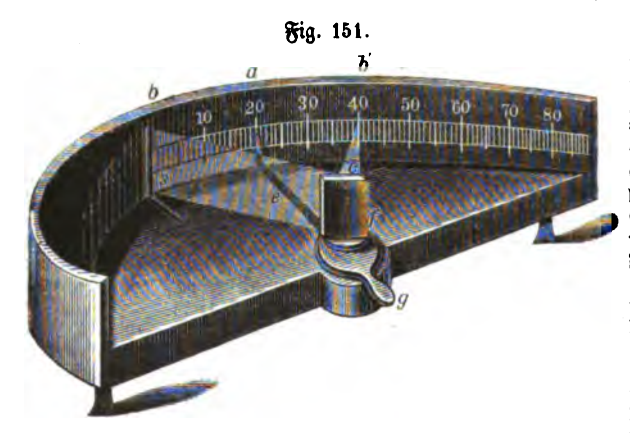
289 **1. Reflexion an einem Flächenelement.** Nach 231 gelten für diese Reflexion, weil das Licht eine Wellenbewegung ist, folgende Gesetze:

1. Der reflectirte Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene.

2. Der reflectirte und der einfallende Strahl liegen auf einer Seite der reflectirenden Fläche, aber auf entgegengesetzten Seiten des Einfallslothes, und der Reflexionswinkel ist gleich dem Einfallswinkel.

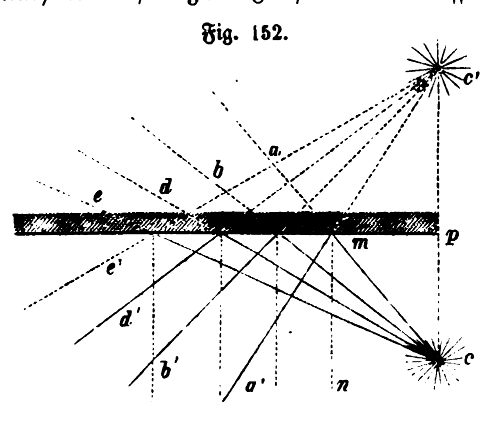
Der Beweis dieser Gesetze ist schon in 231. geführt worden. Nachweisen kann man dieselben auf verschiedene Arten, am einfachsten mittels des Apparates Fig. 151. Durch den Spalt s fällt ein Strahl auf die glatte Fläche f, welche durch den Griff g, dessen Fortsetzung e das Einfallsloth vorstellt, in verschiedene Richtungen gegen den Strahl gebracht werden kann; immer ist leicht an der Gradeintheilung sichtbar, daß der Reflexionswinkel b′ca gleich dem Einfallswinkel bca ist; bei 90° fallen die beiden Strahlen zusammen, der reflectirte Strahl kehrt an die Lichtquelle zurück. Die obere Grenzkante des reflectirten Lichtstreifens liegt weder höher noch tiefer als die obere Grenzkante des einfallenden Streifens; hiermit ist auch das erste Gesetz nachgewiesen.

Fig. 151.



290 **2. Reflexion an einer glatten Fläche.** Glatte Flächen erzeugen Bilder. Dies geschieht nur unter der Voraussetzung, daß die Lichtstrahlen nicht größtentheils durch die glatte Fläche und den betreffenden Körper hindurchgehen, sondern in größerer Menge zurückgeworfen werden; dann sind die glatten Flächen Spiegel, sie erzeugen Bilder derjenigen Punkte, welche Licht auf dieselben werfen.

Fig. 152.



Beweis. Glatte Flächen sind diejenigen, bei welchen die nahe beisammen liegenden Flächenelemente eine und dieselbe Richtung haben; daher werden die auf kleinere Flächentheile fallenden Strahlen in derselben Lage gegen einander zurückgeworfen, wie sie aufgetroffen sind; parallele Strahlen werden parallel zurückgeworfen, nicht parallele Strahlen machen nach der Reflexion dieselben Winkel mit einander wie vor derselben, und schreiten in derselben Lage gegen einander nach der Reflexion fort, wie es ohne die Reflexion geschehen wäre, wie z. B. Fig. 152 zeigt. Die von dem leuchtenden Punkte c ausgehenden Strahlen würden

ohne den Spiegel sp die Lage a, b, d, e gegen einander haben, während sie durch die Reflexion ganz genau dieselbe Lage a', b', d', e' erhalten. Folglich müssen die reflectirten Strahlen auf ein Auge denselben Eindruck machen wie die directen Strahlen, sie müssen ein Bild des Lichtpunktes c erzeugen. Natürlich ist aber durch die Reflexion die Lage der ganzen Strahlengruppe verändert worden, das Bild muß im Allgemeinen eine andere Lage haben als der Lichtpunkt. Wenn nun glatte Flächen von einzelnen Lichtpunkten Bilder erzeugen, so müssen sie auch von beleuchteten, d. h. lichtgebenden Körpern Bilder hervorrufen.

Ebene glatte Flächen erzeugen den Gegenständen gleiche Bilder; krumme glatte Flächen erzeugen ähnliche Bilder, d. i. nur vergrößerte oder verkleinerte Bilder, wenn die Krümmung nach allen Richtungen dieselbe ist; krumme Flächen erzeugen Zerrbilder, wenn sie eine nach verschiedenen Richtungen verschiedene oder unregelmäßige Krümmung besitzen.

Denn bei ebenen glatten Flächen haben auch weit von einander entfernte Flächenelemente dieselbe Richtung; folglich werden auch Strahlen, die in größerer Entfernung von einander die Fläche treffen, nach der Reflexion noch dieselbe Lage gegen einander haben als vor derselben, es wird also ein dem Gegenstande gleiches Bild entstehen. Bei krummen glatten Flächen aber haben weiter von einander entfernte Flächenelemente eine verschiedene Richtung; folglich müssen weiter von einander entfernte Strahlen nach der Reflexion eine andere Lage gegen einander haben als vor derselben: das Bild muß anders aussehen als der Gegenstand. Ist die Krümmung nach allen Richtungen dieselbe, so wird auch das Bild nach allen Seiten in gleicher Weise verändert sein, es kann nur ein verkleinertes oder vergrößertes Bild entstehen; ist dagegen die Krümmung nach verschiedenen Richtungen verschieden, so wird die Veränderung nach der einen Richtung in anderer Weise geschehen als in anderen Richtungen, die Veränderung wird unregelmäßig sein, es werden Zerrbilder entstehen. — Nachweise für diese Sätze bietet das gewöhnliche Leben genug; in ebenen Spiegeln sieht man immer die Gegenstände in gleicher Gestalt und Größe; in Kugelspiegeln sieht man die Gegenstände kleiner oder größer, sonst aber ähnlich; eine Verzerrung tritt nur dann ein, wenn Theile eines Körpers dem Kugelspiegel viel näher sind als andere Theile, weil krumme Spiegel, wie sich später ergeben wird, verschieden entfernte Dinge in verschiedener Weise abspiegeln. Die Verzerrung, die ein Gesicht in einem kugeligen Gartenspiegel zeigt, wird um so stärker, je mehr man sich dem Spiegel nähert. Aechte Zerrbilder entstehen in Cylinder-, Kegel-, Pyramidalspiegeln. Man kann nach dem Reflexionsgesetze die Gestalt eines solchen Zerrbildes geometrisch construiren; umgekehrt lassen sich Zerrbilder nach derselben Regel herstellen, die in solchen Spiegeln zu richtigen Gestalten werden (Katoptrische Anamorphosen).

291 **3. Reflexion an rauhen Flächen.** **Rauhe Flächen erzeugen keine Bilder, sondern diffundiren das Licht, zerstreuen dasselbe nach allen Richtungen und werden dadurch sichtbar. Spiegel dagegen werfen das Licht vorzugsweise nach einer oder nach wenigen Richtungen zurück, diffundiren aber nur wenig Licht und sind daher auch weniger sichtbar.**

Rauhe Flächen haben in engster Nähe abwechselnde Erhabenheiten und Vertiefungen; daher sind ganz nahe beisammen liegende Flächenelemente von den verschiedensten, von allen nur denkbaren Richtungen; folglich müssen die Strahlen, wenn sie auch parallel oder ganz enge an einander liegend auf eine rauhe Fläche fallen, nach den verschiedensten Richtungen zurückgeworfen, nach allen Richtungen ausgebreitet oder diffundirt werden. So diffundirt die Luft das Licht nach allen Richtungen, wodurch es auch an solchen Stellen hell wird, die nicht direct von der Sonne beschienen werden; so diffundiren die oberen Luftschichten das Licht, das sie vor Sonnenaufgang und nach Sonnenuntergang noch empfangen, in die unteren Luftgegenden und erzeugen dadurch die Morgen- und Abenddämmerung. Näheres hierüber in der Physik der Luft, 594.

292 **Lage der Bilder bei ebenen Spiegeln.** **Das Bild eines Lichtpunktes in einem ebenen Spiegel liegt so weit hinter dem Spiegel als der Punkt vor demselben.**

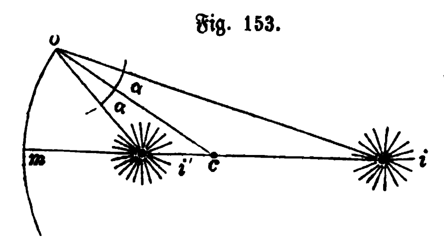
Die Richtigkeit dieses Satzes folgt schon aus dem 231. gefundenen Gesetze, daß der Mittelpunkt einer reflectirten Welle so weit hinter der reflectirenden Ebene liegt als der wellenerregende Punkt vor der Ebene. Doch läßt er sich auch direct beweisen. Da (Fig. 152) die refl. Strahlen a', b', d' und e' dieselbe Lage gegen den Spiegel haben, wie die directen Strahlen a, b, d und e, so müssen sie, rückwärts verlängert gedacht, sich in einem Punkte c' schneiden; dieser Punkt ist das Bild von c, weil die Strahlen a', b', d' und e' von ihm herzukommen scheinen. Die Lage dieses Punktes ergibt sich durch die

Congruenz der Dreiecke cmp und c′mp; denn weil ∡ a′mn = cmn nach dem Hauptsatze, so ist sma′ = pmc; und da sma′ auch = pmc′, so ist pmc′ = pmc; außerdem sind die Dreiecke rechtwinkelig, weil der senkrechte Strahl cp auch wieder senkrecht zurückgeworfen wird und ebenfalls von c′ ausgehen muß. Aus der so erwiesenen Congruenz der beiden Dreiecke folgt, daß cp = c′p, womit der Satz bewiesen ist.

Ebenso wie jeder einzelne lichtgebende Punkt eines Gegenstandes sein Bild in gleichem Abstande hinter dem Spiegel hat, so auch der ganze Gegenstand. Da die Vorderfläche eines Gegenstandes dem Spiegel am nächsten ist, so muß auch von den Theilen des Bildes die Vorderfläche dem Spiegel am nächsten sein; die Vorderfläche und ihr Bild sind sich am nächsten gegenüber. In einem Spiegel erscheinen daher Vorder- und Hintertheil eines Gegenstandes verwechselt; Spiegelbilder in Wasser stehen auf dem Kopfe. Ebenso sind im Spiegel auch die Seitenflächen verwechselt, rechts ist im Spiegel links und umgekehrt: das Spiegelbild von Gedrucktem und Geschriebenem ist unleserlich. — Aus dem Satze ergibt sich auch leicht, daß ein Planspiegel den Winkel halbirt, den ein vorwiegend nach der Länge ausgedehnter Körper mit seinem Spiegelbilde macht; hierauf beruht es, daß in Spiegeln von 45° Neigung ein wagrechter Gegenstand aufrecht steht und umgekehrt; es beruht hierauf die Anwendung von Spiegeln als Fensterspione, in Guckkasten u. s. w., so wie die zahlreiche Verwendung von Spiegeln mit 45° Neigung in physikalischen und anderen Apparaten, z. B. Ritchies Photometer, in Fizeaus Geschwindigkeitsapparat, in Newtons Spiegelteleskop u. s. w. — Weiter folgt aus dem Satze, daß ein Spiegelbild sich doppelt so rasch vom seinem Gegenstande entfernt als der Spiegel, und daß es in einem gedrehten Spiegel den doppelten Drehwinkel des Spiegels beschreibt; auch diese Eigenschaft hat vielfache Verwendung, z. B. bei Foucaults Geschwindigkeitsapparat, bei Wheatstones Apparat zum Messen der Geschw. der Elektricität, beim transatlantischen Telegraphen, beim Spiegelsextant u. s. w. — Endlich ergibt der Satz noch, daß zwei parallele Spiegel unendlich viele Bilder eines zwischen ihnen stehenden Gegenstandes erzeugen, welche aber wegen der wiederholten Absorption immer schwächer werden und daß zwei geneigte Spiegel einen Gegenstand so oft erscheinen lassen, als der Winkel derselben in 360° enthalten ist; hierauf beruht Brewsters Kaleidoskop (1817) (καλός = schön, εἶδος = Gestalt, σκοπέω = sehen) und das Debusskop (von Debus 1860), die beide zum Erfinden von Mustern geeignet sind.

293 **Allgemeine Sätze über die Lage und Größe der Bilder bei sphärischen Spiegeln.** Die Krummspiegel können kugelförmig oder nach der Ellipse, der Parabel oder jeder beliebigen anderen krummen Linie gekrümmt sein; wir betrachten vorwiegend die kugelförmig gekrümmten oder sphärischen Spiegel. Den Mittelpunkt c der Kugelkrümmung (Fig. 153) nennt man den geometrischen Mittelpunkt, den Mittelpunkt m der gewöhnlich kreisförmig begrenzten Spiegelfläche den optischen Mittelpunkt; die Verbindungslinie cm der beiden Mittelpunkte, die unbegrenzte Verlängerung des Krümmungsradius cm wird die optische Achse, und jeder Strahl co, der durch den geometrischen Mittelpunkt geht, wird Hauptstrahl genannt. Die Hauptstrahlen sind von besonderer Wichtigkeit; denn sie

Fig. 153.

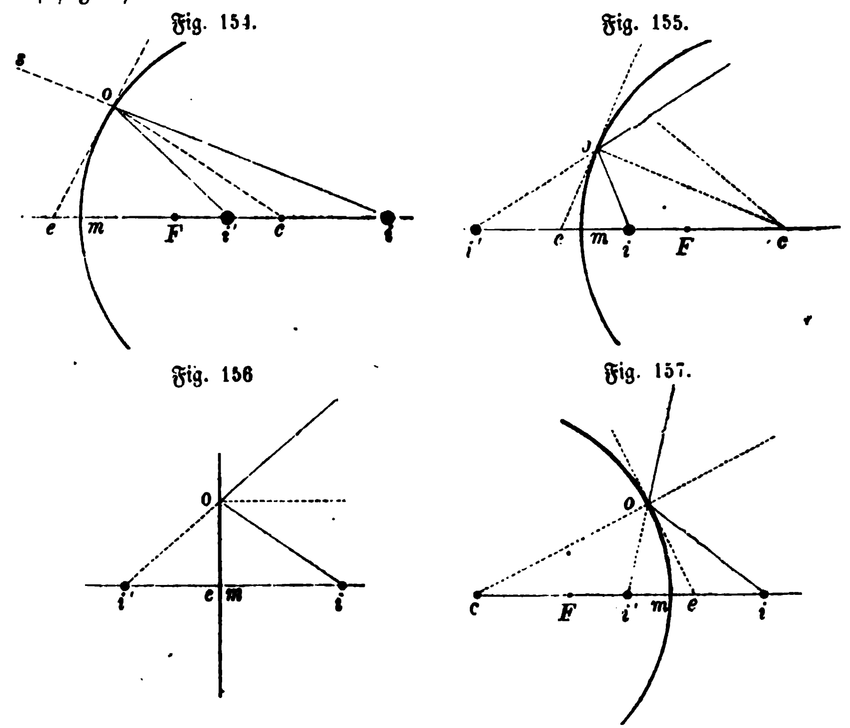


bilden da sie auf dem getroffenen Element der Kugelfläche senkrecht stehen, die Einfallslothe, und werden aus demselben Grunde in sich selbst reflectirt; daher liegt das Bild jedes Punktes eines Hauptstrahles auf demselben Hauptstrahle. Denn ein Bild entsteht an dem Punkte, in welchem sich die reflectirten Strahlen wirklich vereinigen, reelles Bild, oder von welchem, wie bei den ebenen Spiegeln, die reflectirten Strahlen herzukommen scheinen, imaginäres oder virtuelles Bild; wenn demnach die reflectirten Strahlen sich alle in dem Lichtpunkte schneiden, so liegt das Bild auch auf jedem reflectirten Strahle, also auch auf dem Hauptstrahle. Die optische Achse ist ebenfalls ein Hauptstrahl; folglich liegt das Bild jedes Punktes der optischen Achse auf der optischen Achse. Dies erleichtert das geometrische Auffinden der Bilder von Lichtpunkten; liegt z. B. ein solcher Punkt i in der optischen Achse, so hat man nur noch einen reflectirten Strahl nöthig,

um durch seinen Schnitt mit der Achse den Bildpunkt zu erhalten; man zieht z. B. den Strahl io, trägt dessen Einfallswinkel α auf die andere Seite des Einfallslothes co, so erhält man in dem Schnitte i′ des reflectirten Strahles oi′ mit der optischen Achse sofort das Bild i′. Den Abstand mi des Gegenstandes i von dem Spiegel, bezeichnet man mit d, Distanz, Gegenstandsweite, den Abstand mi′ des Bildes i′ vom Spiegel mit b, Bildweite, und den halben Radius r der Kugelfläche, r/2 mit f, Brennweite; der Punkt F nämlich, der in der Mitte zwischen dem optischen und dem geometrischen Mittelpunkte liegt, wird aus bald erhellenden Gründen Brennpunkt (Focus) genannt.

Zwischen diesen Punkten und ihren Entfernungen bestehen sowohl für den nach einwärts gebogenen, concaven oder Hohlspiegel Fig. 154 u. 155, als auch für den auswärts gebogenen, convexen Spiegel, Fig. 157, vorausgesetzt, daß sie sphärische Spiegel sind, ja sogar für den ebenen Spiegel (Fig. 156) mehrere gemeinschaftliche Gesetze, von denen wir die wichtigsten (nach Bauer 1875) hervorheben und beweisen wollen:

I. Der Krümmungsradius wird durch einen in ihm oder in seiner Verlängerung liegenden Punkt und dessen Bild harmonisch getheilt.



Beweis (Fig. 154). Nach einem bekannten geometrischen Lehrsatze findet, da ∢ i′oi durch das Loth co halbirt wird, folgende Proportion statt, i′c : ic = i′o : io. Da der Außenwinkel soi′ des Dreiecks i′oi durch die Tangente oe halbirt wird, so besteht ebenfalls nach der Geometrie auch die Proportion i′e : ie = i′o : io; durch Verbindung beider Proportionen erhält man i′c : ic = i′e : ie. Denkt man sich nun den Punkt o auf dem Hohlspiegel gegen m hin bewegt, so nähert sich e ohne Ende dem Punkt m; setzt man also voraus, daß nur Strahlen, die in der Nähe des Centrums m auf den Spiegel fallen,

sogenannte centrale Strahlen, in Betracht gezogen werden, so kann man mit großer Annäherung statt des Punktes e den Punkt m setzen und erhält dann die Proportion $i'c : ic = i'm : im$ oder $i'c : ic = b : d$, womit der Satz bewiesen ist. Unter der angegebenen Voraussetzung ist demnach $b = d . i'c : ic$, d. h. die Lage des Bildes ist von der Lage der Strahlen unabhängig, die centralen Strahlen vereinigen sich in dem Bildpunkte (für die Randstrahlen gilt dies nicht mehr); und zwar vereinigen sich in dem Falle, der in Fig. 154 vorgestellt ist, die Reflectirten oi' und mi' wirklich, es entsteht ein reelles Bild, das bei greller Beleuchtung frei in der Luft schwebt, bei schwächerer Beleuchtung aber auf einer Tafel aufgefangen oder in düsterem Rauch und Staub sichtbar werden kann. In den folgenden Figuren gehen die reflectirten Strahlen auseinander, scheinen jedoch von einem Punkte i' hinter dem Spiegel auszugehen und erzeugen daher an diesem Punkte ein imaginäres Bild. Leicht ist der Beweis auf diese 3 Fälle auszudehnen; für den Planspiegel ist nur zu bemerken, daß e wirklich mit m zusammenfällt und demnach die oben bemerkte Beschränkung hier nicht stattfindet, und daß $mi' = mi$, daß daher nach den Lehren der harmonischen Theilung der zu m conjugirte Punkt c im Unendlichen liegt, was der ebenen Beschaffenheit des Spiegels entspricht.

II. Das Rechteck aus den Abständen des Brennpunktes von dem Licht- und dem Bildpunkte ist constant und zwar gleich dem Quadrat der Brennweite, oder die Brennweite ist die mittlere geometrische Proportionale zwischen den Abständen des Brennpunktes vom Licht- und vom Bildpunkte.

Beweis. Der Brennpunkt F liegt in der Mitte zwischen m und c, daher ist $mF = cF = f$. In unserer Proportion $ic : i'c = im : i'm$ kann daher gesetzt werden $iF - f$ statt ic, sodann $f - i'F$ statt $i'c$, ebenso $iF + f$ statt im und $i'F + f$ statt $i'm$; hierdurch entsteht die Proportion

$$(iF - f) : (f - i'F) = (iF + f) : (i'F + f) \text{ oder}$$
$$(iF + f) : (iF - f) = (f + i'F) : (f - i'F).$$

Wendet man hierauf die Summen- und Differenzen-Proportion an, so erhält man

$$2 . iF : 2f = 2f : 2 . i'F \text{ oder}$$
$$iF : f = f : i'F \text{ oder } f^2 = iF . i'F.$$

III. Der Abstand des Bildes vom Brennpunkte ist die dritte geometrische Proportionale zum Abstande des Brennpunktes vom Object und zur Brennweite oder $i'F = f^2 : iF$.

Directe Folgerung aus dem vorigen Satze.

IV. Die Größe des Bildes verhält sich zu der des Gegenstandes wie die Bildweite zur Gegenstandsweite.

Beweis (Fig. 158). Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke $a'b'c$ und abc folgt $a'b' : ab = i'c : ic$. Nun ist aber nach dem ersten Satze $i'c : ic = b : d$, als auch $a'b' : ab = b : d$.

294 **Die Bilder der Hohlspiegel.** Wenn die Lichtstrahlen von einem Punkte jenseits des optischen Mittelpunktes kommen, wie in Fig. 154, überhaupt wenn sie nicht stark divergiren, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen vor dem Spiegel wirklich, sie erzeugen ein reelles Bild. Wenn sie jedoch von einem dem Spiegel nahe gelegenen Punkte kommen, stark divergiren wie in Fig. 155, so divergiren sie auch nach der Reflexion, sie scheinen jedoch von einem Punkte hinter dem Spiegel zu kommen, sie erzeugen ein imaginäres Bild. Für jeden der beiden Fälle läßt sich aus den allgemeinen Gesetzen eine Reihe von speciellen Gesetzen ableiten, von denen wir einige anführen wollen:

1. Für ein reelles Hohlspiegelbild ist die reciproke Brennweite gleich der Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Gegenstandsweite.

Beweis. 1. In der Proportion $i'c : ic = b : d$ ist (Fig. 154) $i'c = 2f - b$, $ic = d - 2f$; durch Substitution erhalten wir $(2f - b) : (d - 2f) = b : d$; hieraus $2df - bd = bd - 2bf$ oder $bd = df + bf$. Dividirt man diese Gleichung durch bdf, so ergibt sich $1/f = 1/b + 1/d$.

Beweis. 2. In dem Gesetze $f^2 = iF . i'F$ ist in diesem Falle $iF = d - f$ und $i'F = b - f$; durch Substitution entsteht $f^2 = (d - f)(b - f) = bd - bf - df + f^2$, woraus $bd = df + bf$ und wieder $1/f = 1/b + 1/d$. Da $f = r/_2$, so heißt die Formel auch $1/b + 1/d = 2/r$ . . . . (41)

2. Die doppelte Brennweite ist das harmonische Mittel zwischen der Bildweite und der Gegenstandsweite. Beweis leicht u. s. w.

Aus diesen speciellen Gesetzen, sowie aus den allgemeinen läßt sich die Lage und die Größe der Hohlspiegelbilder für jede beliebige Lage des Gegenstandes ableiten; wir wollen diese Ableitung aus dem Hauptgesetze III vornehmen, dem Studirenden empfehlend, dieselbe auch aus den übrigen Gesetzen zu versuchen. Es entstehen hierdurch die 6 Hohlspiegelregeln:

a. Ein unendlich weit entfernter Gegenstand hat sein Bild im Brennpunkte; das Bild ist unendlich klein.

Denn in der Formel $i'F = f^2 : iF$ ist in diesem Falle $iF = \infty$, also $i'F = 0$; das Bild liegt im Brennpunkte. Nach IV. verhält sich daher die Bildgröße zum Gegenstand wie $0 : \infty$, also ist das Bild unendlich klein. Im Verhältnisse zur Spiegelgröße ist schon die Entfernung der Sonne unendlich groß; also werden die parallelen Sonnenstrahlen im Brennpunkte eines Hohlspiegels vereinigt; es entsteht in demselben eine große Hitze und starkes Licht, woher sich der Name Brennpunkt erklärt. Man kann diese Eigenschaft benutzen, um den Brennpunkt eines Hohlspiegels praktisch zu finden. Dieselbe Eigenschaft der Hohlspiegel soll schon von Archimedes zur Anzündung der römischen Schiffe benutzt worden sein; doch versuchten Buffon, Tschirnhausen u. A. es im vorigen Jahrhundert selbst mit riesigen Spiegeln vergeblich, eine Wirkung auf einige Hunderte von Fußen hervorzubringen. Die Akademie zu Florenz verbrannte 1694 in dem Brennpunkte eines Hohlspiegels einen Diamant und veranlaßte so die Entdeckung, daß der Diamant krystallisirter Kohlenstoff ist. Eine wesentlichere Anwendung hat die Eigenschaft des Hohlspiegels, zur Achse parallele Strahlen in den Brennpunkt zu reflectiren, in der Optik zur geometrischen Construction der Bilder (Fig. 158). Das Bild von a liegt jedenfalls auf dem Hauptstrahle ac, der also der erste Constructionsstrahl ist; den zweiten erhält man durch den zur Achse parallelen Strahl ag; man zieht von g durch F eine gerade Linie, so gibt dieselbe die Lage des reflectirten Strahles und durch ihren Schnitt a' mit dem Hauptstrahle, ac das Bild des Punktes a an. Construirt man auf diese Weise die Bilder aller Punkte von ab, so ergibt sich, was übrigens auch aus den Gesetzen hervorgeht, daß alle Bildpunkte dieselbe Lage gegen einander haben wie die Punkte des Gegenstandes, daß also das Bild dem Gegenstande gleich oder ähnlich ist, und ähnlich gegen den Spiegel liegt wie der Gegenstand. Es bedarf daher zur Auffindung eines Bildes nicht der Construction aller Bildpunkte; hat man z. B. das Bild i' des Punktes i, so ist auch die Lage des Bildes im Ganzen bekannt; zur Feststellung seiner Größe und der Lage der einzelnen Punkte sind nur noch die Bilder der Grenzpunkte nöthig; diese erhält man durch die Hauptstrahlen ac und bc der Grenzpunkte, da auf diesen die Bilder der Grenzpunkte liegen müssen. Die Grenzhauptstrahlen geben also die Größe und Stellung des Bildes an, zeigen z. B. daß in Fig. 158 ein umgekehrtes Bild entsteht.

Fig. 158.

b. Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Unendlichen und dem geometrischen Mittelpunkte, so entsteht zwischen dem Brennpunkte und dem Mittelpunkte ein reelles, verkleinertes, umgekehrtes Bild, das um so näher am Brennpunkte liegt und um so kleiner ist, je größer die Entfernung des Gegenstandes ist.

Denn in der Formel $i'F = f^2 : iF$ ist in diesem Falle $iF < \infty$, also ist $i'F > 0$, und $iF < f$, also ist $i'F > f$, womit die Lage bestimmt ist. Da hiernach $b < d$, so ist nach Satz IV das Bild kleiner als der Gegenstand, und zwar um so kleiner, je größer d im Verhältniß zu d ist, je weiter also der Gegenstand entfernt ist. Die Grenzhauptstrahlen kreuzen sich wie in Fig. 158 zwischen Bild und Gegenstand; also ist das Bild umgekehrt. Dieses Gesetz hat Anwendung in den Spiegelteleskopen.

c. Befindet sich der Gegenstand im Mittelpunkte, so fällt sein Bild mit ihm zusammen.

Denn III ergibt, daß $i'F = f^2 : f = f$, und IV, daß Bild = Gegenstand, weil $b = d$.

d. Befindet sich der Gegenstand zwischen dem Mittelpunkte und dem Brennpunkte, so entsteht jenseits des Mittelpunktes ein reelles, vergrößertes, umgekehrtes

Bild, das um so weiter entfernt und um so größer ist, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte liegt.

Denn in der Formel $i'F = f^2 : iF$ ist in diesem Falle $iF < f$, also $i'F > f$, und zwar wird $i'F$ um so größer, je kleiner iF ist, womit die Angaben über die Lage bewiesen sind. Da hiernach $b > d$, so ist das Bild größer als der Gegenstand, und zwar um so größer, je größer b im Verhältnisse zu d ist, je näher also der Gegenstand dem Brennpunkte kommt. Das Bild ist umgekehrt, weil Bild und Gegenstand auf verschiedenen Seiten des Kreuzungspunktes der Grenzhauptstrahlen liegen.

e. Befindet sich der Gegenstand im Brennpunkte, so ist sein Bild im Unendlichen, die reflectirten Strahlen sind parallel.

Denn hier ist $iF = 0$, also ist $i'F = f^2 : 0 = \infty$; da sich die reflectirten Strahlen erst im Unendlichen, d. h. gar nicht treffen, so sind sie parallel. Diese Eigenschaft hat Anwendung auf Leuchtthürmen, Theatern u. s. w., da durch die reflectirten Strahlen eines grellen im Brennpunkte befindlichen Lichtes die ganze kreisförmige Spiegelscheibe gleichmäßig hell und weithin leuchtend wird. Doch werden hierzu besser parabolische als sphärische Spiegel verwendet, weil erstere nicht blos die centralen, sondern alle Strahlen parallel reflectiren.

f. Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite, so entsteht hinter dem Spiegel ein imaginäres, vergrößertes, aufrechtes Bild, das um so größer und um so weiter entfernt ist, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte liegt.

Denn für einen solchen Gegenstand (Fig. 155) hat iF die entgegengesetzte Richtung wie bisher, ist also negativ und an Zahlenwerth kleiner als f; folglich ist nach III auch $i'F$ negativ und an Zahlenwerth größer als f, und zwar um so größer, je kleiner iF ist; das Bild liegt also hinter dem Spiegel, es ist imaginär. Da dasselbe vom Spiegel ins Unendliche rückt, wenn der Gegenstand vom Spiegel bis in den Brennpunkt geht, so ist die Bildweite größer als die Gegenstandsweite, also auch nach IV das Bild größer als der Gegenstand. Es ist aufrecht, weil es mit dem Gegenstande auf derselben Seite der Kreuzung der Grenzhauptstrahlen liegt. Für diesen Fall erhalten auch die speciellen Gesetze eine veränderte Gestalt: 1. Die reciproke Gegenstandsweite ist gleich der Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Brennweite. 2. Die doppelte Gegenstandsweite ist das harmonische Mittel zwischen der Brennweite und der Bildweite u. s. w., was man leicht durch Anwendung der allgemeinen Sätze auf Fig. 155 finden kann. Dieser Fall hat in dem hohlen Vergrößerungsspiegel Anwendung.

Man weist die 6 Hohlspiegel-Regeln nach mittels der optischen Bank, einer eingetheilten Holzschiene, auf der ein Hohlspiegel, ein Lichthalter und ein Bildschirm verschoben werden können. Ist das Licht sehr weit entfernt, so sieht man nahe am Spiegel ein winzig kleines, umgekehrtes Flämmchen; je näher das Licht kommt, desto mehr muß man ihm den Schirm entgegenrücken, und desto größer wird das umgekehrte Flammenbildchen. Ist das Licht bis in den Mittelpunkt gewandert, so stößt es mit dem Schirme zusammen, und zur Fortsetzung des Versuches muß man ihre Stellungen wechseln; man sieht nun das Bild sehr rasch wachsen und endlich, wenn das Licht im Brennpunkte angelangt ist, in einen formlosen Schein zerfließen, während der ganze Spiegel blendend beleuchtet ist; sogleich taucht hinter dem Spiegel ein riesig großes, aufrechtes Flammenbild auf, das bei weiterer Annäherung des Lichtes ebenfalls heranrückt, kleiner wird und endlich am Spiegel mit dem Lichte zusammenfällt.

Alle diese Gesetze und Erscheinungen gelten nur genau unter der Voraussetzung, daß nur centrale Strahlen zur Vereinigung zugelassen werden; denn nur diese vereinigen sich in einem Punkte, während die weiter vom Centrum entfernt auftretenden Strahlen andere Vereinigungspunkte besitzen, wie eine einfache Construction ergibt; und zwar liegen die Vereinigungspunkte allmälig immer weiter entfernter Strahlen immer nahe beisammen, so daß statt eines Bildlichtpunktes eine Lichtlinie entsteht, die man Brennlinie oder katakaustische Curve nennt. Hierdurch entsteht eine Undeutlichkeit der Bilder sphärischer Spiegel, welche man die sphärische Abweichung nennt. Parabolische Spiegel haben diesen Fehler für parallel auftreffende Strahlen nicht, werden also für die in e angeführten Anwendungen besonders benutzt.

295 **Die Bilder der Convexspiegel.** Convexspiegel erzeugen nur imaginäre, verkleinerte, aufrechte Bilder, die um so kleiner und um so weiter entfernt sind, je größer die Entfernung des Gegenstandes ist.

Denn, wie Fig. 157 zeigt, werden die Strahlen des Punktes i so reflectirt, daß sie von einem Punkte hinter dem Spiegel zu kommen scheinen: das Bild ist imaginär. Es liegt mit dem Gegenstande auf einer Seite des Kreuzungspunktes der Grenzhauptstrahlen,

ist also aufrecht. Das Gesetz der reciproken Werthe nimmt wieder eine andere Gestalt an; denn hier ist in der Proportion des I. Gesetzes $i'c : ic = i'm : im$ nach Fig. 157 zu setzen $2f - b$ statt $i'c$, sodann $2f + d$ statt ic, weiter b statt $i'm$ und d statt im, wodurch man erhält $(2f - b) : (2f + d) = b : d$ oder $2df - bd = 2bf + bd$ oder $bd = df - bf$, woraus sich durch Division mit bdf ergibt $1/f = 1/b - 1/d$ oder $1/b = 1/d + 1/f$. Aus diesem Gesetze der reciproken Werthe folgt, daß b immer kleiner ist als d, daß also nach Gesetz IV das Bild immer kleiner ist als der Gegenstand, sodann daß b mit d, aber langsamer zunimmt als d, daß daher die Bilder mit wachsender Entfernung des Gegenstandes sich langsam entfernen und langsam kleiner werden. Ist z. B. $d = f$, so ist $b = 1/_2 f$; ist $d = \infty$, so ist $b = f$. Ein einigermaßen weit entfernter Gegenstand hat daher ein außerordentlich kleines Bild am Brennpunkte des Spiegels; daher werden solche Spiegel zu physikalischen Versuchen und außerdem als Gartenschmuck verwendet.

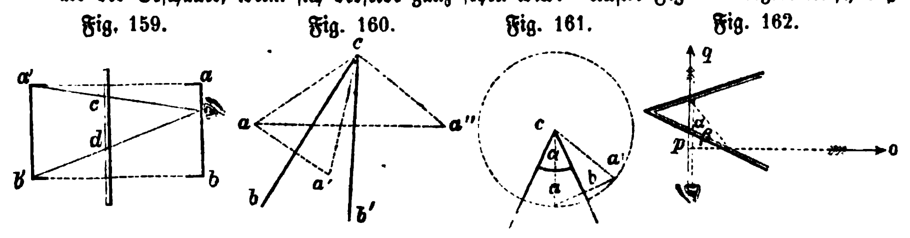
Anwendung und Anfertigung der Spiegel. Die Planspiegel oder auch schwachgekrümmten Spiegel, die zum Hausgebrauche dienen, sind gewöhnlich Glastafeln, die auf der Rückseite mit Zinnamalgam belegt sind. Glas für sich allein reflectirt nämlich zwar ebenfalls das Licht, läßt aber gewöhnlich so viel Licht durch, daß das schwache reflectirte Licht neben dem starken durchgelassenen verschwindet; nur wenn Glasscheiben einen dunkeln Hintergrund haben, wie an eine dunkle Wand gelehnte Fensterscheiben oder Fenster bei Nacht, spiegeln sie einigermaßen. Damit sie stärker spiegeln, gibt man ihnen durch den Beleg eine undurchsichtige Rückseite, die Spiegelfolie; denn alsdann lassen sie kein Licht durch, werfen also sämmtliche auffallende Strahlen zurück und werden so zu Spiegeln. Die Spiegelfolie wird hervorgebracht, indem man eine sehr dünne Stanniolplatte auf einer horizontalen Tafel ausbreitet, dieselbe mit Quecksilber bespritzt und dann die Glastafel mit Vorsicht auf die Stanniolplatte schiebt und etwa einen Tag lang aufpreßt. In neuerer Zeit wird als Spiegelfolie eine dünne Silberschicht angewendet, welche auf chemischem Wege auf der Rückseite der Glastafel niedergeschlagen wird. Liebigs Methode (1856) zur Bildung dieser Silberhaut ist folgende: Die Glastafeln werden in ein 25° warmes Bad aus Wasser, einer Versilberungsflüssigkeit und einer Reductionsflüssigkeit gebracht; die erstere besteht aus Lösungen von Silbernitrat, Ammoniumsulfat und Aetznatron, die letztere aus Lösungen von Candiszucker, Weinsäure, weinsaurem Kupfer und Aetznatron. Den Spiegeln mit Silberfolie schreibt man eine stärkere reflectirende Kraft, helleren Glanz und stärkeres Feuer als den Quecksilberspiegeln zu; auch sind sie nicht wie die Quecksilberspiegel der Gesundheit der Arbeiter schädlich. Um das dünne Silberhäutchen zu schützen, wird es gefirnißt oder galvanisch verkupfert. Indessen haben alle Spiegel mit spiegelnder Rückseite den Nachtheil, daß sie mehrere Bilder erzeugen, und daß daher das Hauptbild undeutlich wird. Dieses Hauptbild wird nämlich von der Belegung hervorgerufen; doch gibt die Vorderseite des Glases ebenfalls ein Bild, das zwar bei senkrechtem Auffallen der Strahlen mit dem von der Rückseite gebildeten zusammenfällt und auch bei schiefer Richtung der Strahlen wegen seiner Schwäche in Fällen des gewöhnlichen Lebens nicht bemerkt wird; spiegelt sich aber ein heller Lichtpunkt, wie es bei optischen Versuchen häufig vorkommt, so sieht man von der Seite her zwei und mehr Bilder, eines von der Vorderseite, eines von der Rückseite, ein drittes, welches durch Reflexion der Strahlen des zweiten an der Vorder- und der Rückseite gebildet wird, ein viertes, das durch dieselbe zweimalige Reflexion entsteht u. s. w.; diese Bilder sind um so weiter von einander entfernt und daher um so deutlicher, je größer die Dicke des Spiegels ist, die man ungefähr durch das Aufsetzen eines spitzigen Gegenstandes auf die Vorderfläche des Spiegels erkennen kann. Da die Nebenbilder das von der Rückseite gebildete Hauptbild undeutlich machen und verwirren, so sind für genaue und für messende Versuche die Glasspiegel unbrauchbar, ausgenommen, wenn die Rückseite geschwärzt ist; in diesem Falle absorbirt der schwarze Ueberzug alles durchgehende Licht, und es entsteht nur ein Bild von der Vorderseite, das aber sehr lichtschwach ist. Viel besser sind die Silber- oder Platinspiegel, welche aus einer auf der Vorderseite einer Glastafel niedergeschlagenen Silber- oder Platinschicht bestehen; denn dieselben geben nur ein Bild und zwar ein sehr helles, machen außerdem das Poliren der Rückseite überflüssig, und können auch als Blendgläser bei Sonnenbeobachtungen, als Spionirgläser und als Schutzbrillen verwendet werden, weil sie von der Rückseite her schwach durchsichtig sind. Die Methode von Dodé für Anfertigung der Platinspiegel ist folgende: Trocknes Platinchlorid mit Lavendelöl gemischt wird mit Bleiglätte und Bleiborat zusammengerieben, die Mischung mit einem Pinsel auf die polirte Glasfläche getragen, und die Glastafel dann in einer gußeisernen Muffel in einem eigenen Ofen erhitzt, wodurch das Platin reducirt und in die Tafel eingebrannt wird. — Auch große Hohlspiegel für Teleskope wurden schon 1858 von Foucault aus versilbertem Glase angefertigt. Sehr vortrefflich wären die Stahlspiegel, weil sie die feinste Politur zulassen, wenn sie nicht dem Rosten ausgesetzt wären. Die Legirung der gewöhnlichen Metallspiegel besteht aus 64 Th. Kupfer und 20 Th. Zinn, oder aus 1 Th. gutem Messing und 1 Th. Arsenik.

296

Außer dem Hausgebrauche dienen die Planspiegel bei zahlreichen physikalischen, astronomischen und geodätischen Apparaten; die wichtigsten sind: 1. Der Winkelspiegel, der zum Fällen von Senkrechten auf dem Felde verwendet wird; derselbe besteht aus zwei kleinen Spiegeln, die in einem Gehäuse unter 45° gegen einander so befestigt sind, daß man über den einen hinaus nach dem einen Objecte und gleichzeitig in demselben durch doppelte Reflexion das andere Object sehen kann; erscheinen dann die beiden Objecte direct unter einander, so sind die von beiden nach dem Auge gezogenen Linien senkrecht auf einander. (S. Aufg. 488.) 2. Der Spiegelsextant (Newton 1680 (?), Godfrey 1730), der zum Messen von Winkeln auf dem Felde und am Himmel benutzt wird. Er besteht aus einem Gestelle von der Form eines Sectors von 60°, um dessen Mittelpunkt eine breite Schiene (Alhidade) drehbar ist, die am Umfange einen der Gradtheilung (Limbus) des Sextanten entsprechenden Nonius und am Mittelpunkte einen senkrechten Spiegel trägt, der sich mit der Alhidade dreht. An dem einen Schenkel des Sectors steht ein zweiter senkrechter Spiegel, der mit dem ersten parallel ist, wenn die Alhidade auf dem Nullpunkte des Limbus steht. Gegenüber diesem Spiegel ist ein Fernrohr befestigt, durch welches man in den Spiegel und über denselben hinaus nach einem entfernten Objecte sehen kann. Dreht man nun die Alhidade so weit, daß man durch das Fernrohr in dem zweiten Spiegel ein zweites Object unter dem ersten sieht, so gibt die Größe der Drehung der Alhidade die halbe Größe des Winkels an, den die von den beiden Objecten nach dem Auge gedachten Geraden einschließen. (S. Aufg. 489.) 3. Das Reflexionsgoniometer (Wollaston 1809) dient zum Messen des Winkels, unter dem zwei Krystallflächen gegen einander geneigt sind und beruht darauf, daß man einen Krystall um diesen Winkel drehen muß, um in der zweiten Fläche das Bild eines beliebigen Objectes an derselben Stelle zu sehen, an welcher man es in der ersten Fläche gesehen hat. 4. Der Heliostat (s'Gravesande 1742) dient zum Einleiten von Sonnenstrahlen durch eine Ladenöffnung in ein dunkles Zimmer. Er besteht aus einem geneigten Spiegel, der bei unvollkommenen Apparaten von dem Zimmer aus, bei vollkommenen durch ein Uhrwerk so nach dem Sonnenstande gedreht wird, daß die reflectirten Strahlen immer direct durch die Oeffnung in das Zimmer dringen. 4. Das Heliotrop (Gauß 1821), besteht aus senkrecht auf einander stehenden Spiegeln, die so an einem Fernrohre angebracht sind, daß man in dem einen das Sonnenbild sieht, wenn es durch den anderen nach einem entfernten Orte als Signal geworfen wird. Gauß gab hiermit Signale auf 10 M. Entfernung. 6. Der Zauberguder und die Mauerperspective.

297 Aufg. 479. Ich stand p^m von einer Wand entfernt und sah schief in einen Spiegel an der Wand; an einem Punkte, der q^m von mir entfernt war, erblickte ich das Bild eines Gegenstandes; Bild und Gegenstand erschienen unter einem Winkel von α^0; wie weit war der Gegenstand von mir und wie weit von der Wand entfernt? Aud.: Den Einfallswinkel x findet man durch die Gl. $\sin x = p : q$; dann folgt die erste Entf. $= q \sin 2x : \sin(2x - \alpha)$, die zweite $= q \sin\alpha \sin x : \sin(2x - \alpha)$. — A. 480. Man erblickt das Bild der 45° hoch stehenden Sonne in einem 100^m entfernten Bache; wie hoch steht man? Aufl.: 70^m. — A. 481. Man sieht auf einem h^m hohen Leuchtthurme eine Wolke um den Winkel β und ihr Spiegelbild um den Winkel α gegen eine durch das Auge gehende Wagrechte geneigt; wie weit ist die Wolke von dem Beobachter entfernt und wie hoch über dem Wasser? Aufl.: $2h \cos\alpha : \sin(\alpha - \beta)$ und $h \sin(\alpha + \beta) : \sin(\alpha - \beta)$. — A. 482. In einem Wasserspiegel, a^m unter uns und b^m von uns entfernt, sieht man das Bild der Spitze eines Thurmes, der c^m von uns entfernt ist; wie hoch ist der Thurm? Aufl.: $a(c - b) : b$. — A. 483. Warum muß ein Spiegel wenigstens halb so hoch sein als der Beschauer, wenn sich derselbe ganz sehen will? Aufl.: Fig. 159 ergibt leicht, daß

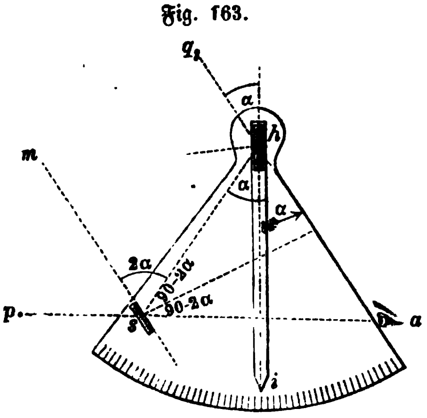
Fig. 159. Fig. 160. Fig. 161. Fig. 162.



$cd = \frac{1}{2}(a'b')$ also auch $= \frac{1}{2} ab$. — A. 484. Zu zeigen, daß ein Bild den doppelten Winkel des Spiegels beschreibt? Aufl.: Fig. 160 ergibt leicht, daß $\angle a'ca'' = 2 \angle bcb'$. — A. 485. Zu zeigen, daß alle Bilder in zwei gegen einander geneigten Spiegeln auf einem Kreisumfange liegen? Aufl.: Aus $ab = a'b$ ergibt sich auch $ac = a'c$ u. s. w.

(Fig. 161). — A. 486. Zu zeigen, daß die Zahl der Bilder $= (360 : \alpha) - 1$, wenn α in 360 aufgeht, daß aber, wenn α in 360 nicht aufgeht, die Anzahl der Bilder auch direct gleich der ganzen Zahl des Quotienten $360 : \alpha$ sein kann? Anb.: Man überzeuge sich durch Fortsetzung der Construction Fig. 161, daß in jedem Sector mit dem Winkel α ein Bild enthalten ist. — A. 487. Zu beweisen, daß ein Spiegel den Winkel eines Gegenstandes mit seinem Bilde halbirt? Anb.: Hauptsatz in 292. — A. 488. Zu beweisen, daß die Visirlinien der 2 im Winkelspiegel über einander gesehenen Objecte auf einander senkrecht stehen? Anb.: In Fig. 162 beweise man, daß $\alpha + \beta = 90^0$; dann ist auch gezeigt, daß op auf qp senkrecht steht. — A. 489. Zu beweisen, daß im Spiegelsextant der Winkel der Visirlinien der beiden Objecte, die man über und in dem festen Spiegel senkrecht unter einander sieht, doppelt so groß ist, als der Drehwinkel der Alhidade? Anb.: der Visirwinkel der beiden Objecte q und p (Fig. 163) ist qap; der Winkel, um welchen die Alhidade hi vom Nullpunkte an gedreht wurde, ist α; man hat also zu beweisen, daß qap $= 2\alpha$, was nach den in der Figur angegebenen Winkelgleichheiten leicht ist. Diese Gleichheiten beruhen theils auf dem Reflexionsgesetze, theils darauf, daß der feste Spiegel s der Gegenseite ha des Sextanten parallel steht. — A. 490. Wann zeigt ein Planspiegel bei senkrechter Richtung der Strahlen doch zwei Bilder? Aufl.: Wenn die Vorderfläche und die Hinterfläche nicht genau parallel sind (Erklärung). — A. 491. Wie erkennt man, ob man einen Metall- oder einen Glasspiegel vor sich hat? Aufl.: Durch einen aufgesetzten Stift. — A. 492. Wie groß ist die Dicke eines Glasspiegels, auf den ein Stift gesetzt ist? Aufl.: Gleich der halben Entfernung der Spitze von ihrem Bilde. — Warum erkennt man durch einen solchen Stift die Dicke der Glastafel nur

Fig. 163.



ungefähr? Anb.: Schiefe Richtung des Sehens. — A. 493. Warum spiegeln die Fensterscheiben nur bei Nacht die Gegenstände im Zimmer? Anb.: Vergleiche das refl. Licht mit dem durchgelassenen für beide Tageszeiten. — A. 494. Der Studirende übe sich in dem Construiren von Bildern von Punkten und Gegenständen in Hohl- und Convexspiegeln für alle in 294. angegebenen und noch denkbaren Fälle nach den beiden in 293. und 294. angegebenen Methoden; s. Fig. 153 u. 158. — A. 495. Wie groß ist die Bildweite bei einem Hohlspiegel, wenn die Gegenstandsweite $= 10r, 7r, 4r, 3r, 1\frac{1}{2}r, r, \frac{2}{3}r, \frac{1}{2}r, \frac{1}{4}r, 0{,}1r$? Aufl.: Nach Fl. (41) ist $b = dr : (2d - r)$, also hier $= \frac{10}{19}r, \frac{7}{13}r, \frac{4}{7}r, \frac{3}{5}r, \frac{3}{4}r, r, 2r, \infty, -\frac{1}{2}r, -\frac{1}{8}r$. — A. 496. Wo liegen die Bilder in einem Convexspiegel, wenn $d = 10r, 2r, r, \frac{1}{2}r$? Aufl.: Nach 295. ist $b = dr : (2d + r)$; also $b = \frac{10}{21}r, \frac{2}{5}r, \frac{1}{3}r, \frac{1}{4}r$. — A. 497. Die Bildweite für beide Spiegelarten durch die Brennweite auszudrücken? Aufl.: $b = df : (d - f)$ und $b = df : (d + f)$. — A. 498. Die Brennweite durch die übrigen Dimensionen auszudrücken? Aufl.: $f = bd : (d \mp b)$. — A. 499. Wenn ein Gegenstand von 100^{cm} Entf. sein Bild in 5^{cm} Entf. hat, wie groß ist dann die Brennweite? Aufl.: $4\frac{16}{21}{}^{cm}$. — A. 500. Wie groß ist ein Bild l' im Hohlspiegel im Vergleiche zum Gegenstande, dessen lineare Ausdehnung $= l$ ist? Aufl.: Nach Gesetz IV ist $l' : l = ci' : ci$ oder $l' : l = 2f - b : d - 2f$; hieraus $l' = l(2f - b) : (d - 2f)$; hierin den Werth für b aus A. 497 ergibt $l' = lf : (d - f)$. — A. 501. Hieraus zu suchen, wann die Größe des Bildes $0, \frac{1}{2}l, l, 2l, 10l, \infty$ ist? Aufl.: Wenn $d = \infty, 3f, 2f, \frac{3}{2}f, 1{,}1f, f$. — A. 502. Die Größe des Bildes in einem Convexspiegel anzugeben? Aufl.: $l' = lf : (d + f)$. — A. 503. Ist bei Convexspiegeln für f der Name Brennweite geeignet? Aufl.: Bei Convexspiegeln vereinigen sich die Strahlen überhaupt nicht, sondern werden durch den Spiegel zerstreut (Zerstreuungsspiegel); parallel zur Achse auftreffende Strahlen werden so zerstreut, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel, dessen Spiegelabstand = f ist, herkämen; daher nennt man f hier Zerstreuungsweite. — A. 504. Wie groß ist das Sonnenbild in einem Brennspiegel? Aufl.: Der Durchmesser ist $2f \tang 16' = \frac{1}{108}f$. — A. 505. Wie groß ist die Concentration der Sonnenstrahlen in einem Spiegel, dessen Durchmesser = d ist? Anb.: Sämmtliche Strahlen, die auf den Spiegel fallen, werden in den Kreis concentrirt, dessen Durchmesser $= \frac{1}{108}f$ ist; folglich ist die Concentration $d^2 : (\frac{1}{108}f)^2 = (108\,d)^2 : f^2$. — A. 506. Wie groß ist die Concentration, wenn statt des Spiegeldurchmessers seine Apertur 2α (d. i. die Zahl seiner Bogengrade) gegeben ist?

Aufl.: Durchmesser des Spiegels $= 4f \sin\alpha$; daher Concentration $= 16 f^2 \sin^2\alpha : (1/_{108}f)^2 = (432 \sin\alpha)^2$. — A. 507. Wie groß ist die Concentration für einen Spiegel, dessen Apertur 60° ist? Aufl.: 46 656. — A. 508. Wenn durch directe Insolation die Temperatur einer gegebenen Masse, die alle auffallenden Strahlen absorbirt, in einer bestimmten Zeit z. B. in 1 Minute um 20° steigt, wie hoch steigt sie dann im Brennpunkte eines Hohlspiegels? Aufl.: 20 . 46656 = 933 120°.

5. Die Lehre von der Brechung des Lichtes.

Die Dioptrik.

298 **Begriff und Gesetze der Brechung.** (Snellius 1620). Unter der Brechung des Lichtes versteht man die Ablenkung, welche die Lichtstrahlen erfahren, wenn sie aus einem durchsichtigen Medium in ein anderes übergehen. In verschiedenen Körpern hat nämlich der Aether eine verschiedene Dichte, z. B. in dichteren Körpern gewöhnlich eine größere Dichte, weil durch die größere Molekular-Anziehung dichterer Körper auch eine größere Aethermenge in dem Inneren des Körpers festgehalten wird; die Elasticität des Aethers muß aber in verschiedenen Körpern gleich sein, weil sonst Aether aus dem einen Körper in den anderen treten müßte; es ist dies auch leicht dadurch erklärlich, daß die größere Abstoßung des dichteren Aethers durch die größere Anziehung der Körperatome aufgewogen wird. Hiernach muß für dichtere Stoffe der bekannte Ausdruck $\sqrt{(e:d)}$ kleiner werden und daher die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes abnehmen. Dies ergibt sich auch aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft: denn damit in dem Medium mit dichterem Aether die lebendige Kraft der fortschreitenden Schwingungsbewegung dieselbe bleibe, muß die Geschwindigkeit derselben kleiner werden. Für das Wasser haben Fizeau und Foucault wirklich die Lichtgeschwindigkeit gleich 3/4 von der Geschwindigkeit in der Luft gefunden. Wenn nun aber eine Wellenbewegung ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit ändert, so werden nach 282. die Strahlen derselben von ihrer Richtung abgelenkt; folglich müssen auch die Lichtstrahlen von ihrer Richtung abgelenkt, gebrochen werden, und zwar nach folgenden zwei, in 232. für alle Wellenbewegungen bewiesenen Gesetzen:

1. Der gebrochene Strahl liegt in der durch den einfallenden Strahl und das Einfallsloth bestimmten Ebene. 2. Der gebrochene und der einfallende Strahl liegen auf entgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche und des Einfallslothes, und der Sinus des Einfallswinkels und der Sinus des Brechungswinkels stehen in einem constanten Verhältnisse. Dieses Verhältniß ist nach 232. gleich dem Quotient der Geschwindigkeiten des Lichtes in beiden Medien, wird Brechungsexponent genannt und mit n bezeichnet; es ist sonach

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n \qquad (32)$$

Für den Uebergang aus einem dünneren in ein dichteres Medium ist n gewöhnlich größer als 1, weil die Lichtgeschwindigkeit in dünneren Stoffen meistens größer ist als in dichteren; für den Uebergang aus einem dichteren Medium in ein dünneres ist n gewöhnlich kleiner als 1.

Den Nachweis für den Vorgang und die Gesetze der Brechung kann man am einfachsten mit einem halbkreisförmigen Gefäße führen, dessen krumme Grenzfläche eine Gradeintheilung trägt, während die gerade, in den Durchmesser fallende Grenzfläche an der Stelle des Mittelpunktes durchsichtig ist und einem Lichtstreifen Eingang gestattet; an der Gradeintheilung kann man den Einfallswinkel ablesen. Gießt man das Gefäß nun halb voll Wasser (oder einer anderen Flüssigkeit), so bleibt die obere Hälfte des Lichtstreifens an der früheren Stelle stehen; die untere, durch das Wasser gehende Hälfte dagegen ist ab-

gelenkt. Liest man an der Skale den Brechungswinkel ab und sucht das Sinusverhältniß, so findet man dasselbe = 4/3. Denselben Versuch wiederholt man für beliebig viele Einfallswinkel und findet dann immer dasselbe Resultat, womit das zweite Gesetz nachgewiesen ist. Da die untere Hälfte des Lichtstreifens weder an der oberen noch an der unteren Grenze eine Veränderung zeigt, so ist damit auch das erste Gesetz dargethan.

Aus dem Hauptgesetze $\sin\alpha : \sin\beta = n$ folgt noch eine Reihe anderer Gesetze: 3. Stehen die Strahlen auf der Oberfläche des neuen Mediums senkrecht, so gehen sie ungebrochen weiter. Denn für $\alpha = 0$ ergibt die Fl. (32.) auch $\beta = 0$; der Nachweis ist mit obigem Apparate zu führen. — 4. Je größer der Einfallswinkel ist, oder je schiefer die Strahlen auftreffen, desto stärker ist die Brechung. Beweis: $\sin\alpha : \sin\beta = n$ ergibt nach einem Satze aus der Proportionslehre $\sin\alpha - \sin\beta : \sin\beta = n - 1 : 1$, woraus $\sin\alpha - \sin\beta = (n-1)\sin\beta$; führt man hierin die bekannte Formel für die Differenz zweier Sinusse ein, so folgt $2\sin\frac{1}{2}(\alpha-\beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta) = (n-1)\sin\beta$, woraus sich ergibt $\sin\frac{1}{2}(\alpha-\beta) = (n-1)\sin\beta : 2\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$. Hieraus ist ersichtlich, daß die Differenz $\alpha - \beta$ wächst, wenn β und daher auch α zunimmt; denn alsdann nimmt der Zähler des Bruchwerthes zu und der Nenner ab. Der obige Apparat kann auch hier zum Nachweise benutzt werden. — 5. Geht der Strahl aus einem dünneren in ein dichteres Medium über, so wird er gewöhnlich zum Lothe gebrochen; denn für diesen Fall ist $\sin\alpha : \sin\beta > 1$, also ist der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel, der gebrochene Strahl ist dem Lothe näher als der einfallende. Zum Nachweise für Wasser und andere Flüssigkeiten kann der obige Apparat dienen. Läßt man in ein dunkles Zimmer einen Lichtstrahl schief gegen den Boden fallen und stellt ihm dann einen Glaswürfel in den Weg, so liegt der Fußpunkt des Strahles weiter zurück als vorher. — 6. Geht der Strahl aus einem dichteren Medium in ein dünneres über, so wird er gewöhnlich vom Lothe gebrochen; denn für diesen Fall ist $\sin\alpha : \sin\beta < 1$, also ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel, der gebrochene Strahl liegt weiter von dem Lothe weg als der einfallende. Zum Nachweise dient folgender Versuch: Man lege in ein undurchsichtiges Gefäß eine Münze und stelle sich so, daß man dieselbe eben nicht mehr sehen kann; es werden dann die von der Münze nach dem Auge gerichteten Strahlen von dem Rande aufgefangen, und in die Luft neben dem Gefäße gelangen nur höher gerichtete Strahlen, Strahlen mit kleineren Einfallswinkeln. Gießt man nun Wasser in das Gefäß, so wird die Münze sichtbar; es sind also die in die Höhe gerichteten Strahlen bei dem Austritte aus dem Wasser nach dem Auge hin abgelenkt worden, sie sind mehr der Wasserfläche genähert, vom Lothe entfernt worden. Da das Auge einen Gegenstand immer in derjenigen Richtung sieht, in welcher dessen Strahlen in das Auge gelangen, und da hier die ins Auge gelangenden Strahlen viel flacher als die directen Verbindungsstrahlen gerichtet sind, so muß das Auge die Münze höher erblicken als sie ist; ebenso sieht man den Boden von Wasser und Gegenstände in demselben immer höher als sie sind; ebenso erscheinen alle Theile eines schief eingetauchten Stabes höher, der Stab scheint an der Oberfläche geknickt zu sein. Uebrigens findet nach Bauer (1874) hierbei nicht blos eine senkrechte, sondern auch eine wagrechte Verschiebung nach dem Auge hin statt; beide sind bei senkrechter Betrachtung des Gegenstandes am kleinsten, die letztere = 0, die erstere für Wasser etwa 1/4 der Höhe (Näheres 300.) — 7. Geht der Strahl durch ein Medium mit parallelen Eingangs- und Austrittsflächen, so wird er nicht von der Richtung abgelenkt, sondern nur ein wenig zur Seite gerückt; denn er wird bei dem Eingange ebenso viel zum Lothe gebrochen als bei dem Austritte von demselben. Nachweise sind durch dicke Glastafeln oder durch Glasgefäße mit parallelen Seitenwänden zu führen, die mit Wasser gefüllt sind. Die Verrückung ist um so größer, je dicker der Körper ist;

daher sehen wir durch unsere Fensterscheiben die Gegenstände nur sehr wenig verschoben. (Die Größe der Verschiebung s. 300.) — 8. Wenn die Eingangs- und die Austrittsfläche eines Strahles nicht parallel sind, wenn also der Körper ein Prisma ist, so wird die Richtung des Strahles stark verändert, und außerdem wird der Strahl in seine Farbenbestandtheile zerlegt. Diese beiden wichtigen Erscheinungen bedürfen einer später folgenden speciellen Betrachtung.

Kennt man den Brechungsexponent eines Körpers, so kann man die Lage des gebrochenen Strahles nicht blos berechnen, sondern auch durch geometrische Construction finden. Man beschreibt um den Fußpunkt a (Fig. 164) des einfallenden Strahles ba mit dem Radius = 1 einen Kreis und fällt von dem Schnittpunkte b dieses Kreises mit dem Strahle eine Senkrechte bc auf das Einfallsloth: dieses ist der Sinus des Einfallswinkels. Für den Uebergang aus Luft in Wasser muß der Sinus des Brechungswinkels 3 sein,

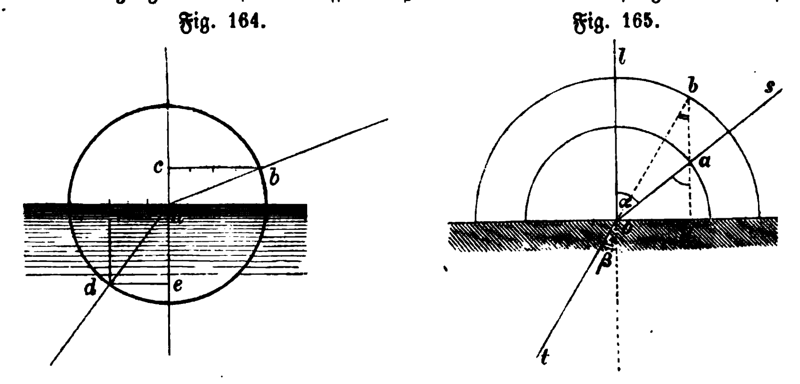


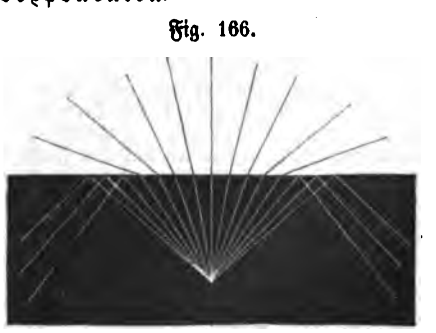
Fig. 164. Fig. 165.

wenn der des Einfallswinkels 4 ist; man theilt also bc in 4 gleiche Theile und trägt 3 davon auf die Oberfläche des neuen Mediums von a aus. Durch eine Senkrechte bringt man diesen Abstand an seine richtige Stelle de und hat dann in ad den gebrochenen Strahl. Einfacher und allgemeiner ist die Construction von Reusch (1862): Man schlage um den Einfallspunkt o (Fig. 165) des Strahles so zwei Kreise, deren Radien im Verhältnisse der Lichtgeschwindigkeiten in beiden Medien stehen, z. B. für Luft in Crownglas wie 3 : 2, ziehe durch den Schnittpunkt a des Strahles mit dem Kreise des neuen Mediums eine Parallele db zu dem Einfallslothe lo, und verbinde den Schnittpunkt b dieser Parallelen und des Kreises des neuen Mediums mit dem Einfallspunkte o, so ist die Verlängerung ot dieser Verbindungslinie der gebrochene Strahl. Denn der Winkel oad = α und der Winkel obd = β. Nun ist aber sin obd, also auch sin β = od : ob und sin oad also auch sin α = od : oa. Durch Division der letzteren Gleichung mit der ersteren erhält man sin α : sin β = ob : oa = c : c′ = n, hier = 3 : 2. — Von den Gesetzen 5 und 6 bilden besondere Ausnahmen die brennbaren Körper, wie Diamant, Schwefelkohlenstoff, Terpentinöl, Spiritus. Sie brechen das Licht stärker zum Lothe als andere Körper von gleicher und von größerer Dichte; sie concentriren daher das Licht mehr und leuchten stärker als andere Körper. — Durch ein polyedrisches Glas sieht man Gegenstände vielfach, weil aus jeder Fläche die Strahlen in anderer Richtung treten; dioptrische Anamorphosen. — Vermöge der Brechung erscheinen Himmelskörper, wie auch ferne, hohe irdische Körper höher als sie sind; man nennt diese Erscheinung die astronomische und die terrestrische Strahlenbrechung. Die Strahlen der Himmelskörper gehen nämlich aus dem leeren Raume in dünne und dann in immer dichtere Luftschichten über; sie werden also fortwährend zum Lothe gebrochen. Wenn sie schon lothrecht sind, so ist diese Brechung unmöglich; die Brechung ist also für das Zenith gleich Null; die Strahlen aber, die vom Horizont in die Luft herein kommen, treffen die Luftschichten unter sehr schiefen Winkeln, erfahren also eine starke Brechung, eine starke Annäherung an das Loth. Sie gelangen in das Auge, als ob sie mehr von oben kämen; die Himmelskörper erscheinen höher als sie sind. Am Horizont beträgt die Brechung ca $1/2^0$; Sonne und Mond erscheinen daher schon auf- oder noch nicht untergegangen, wenn sie eben unter dem Horizonte stehen; dies hat eine Verlängerung des Tages zur Folge, die in den polaren Gegenden sehr beträchtlich ist. Die Strahlenbrechung nimmt vom Horizont an rasch ab; während sie genau in demselben 35′ beträgt, ist sie in $1/2^0$ Höhe nur noch 28′; daher wird der untere Rand von Sonne

und Mond mehr gehoben als der obere; diese beiden Ränder erscheinen einander näher gerückt, während der wagrechte Durchmesser seine Größe behält. Sonne und Mond erscheinen deßhalb am Horizont abgeplattet. In 1° Höhe ist die astr. Refraction nur noch 24′, in 10° Höhe 5, in 45° Höhe 1′; in der Nähe des Horizontes ist sie unregelmäßig, weil die Luftmassen zwischen dem Auge und dem Himmelskörper in höchst unregelmäßiger Weise wechseln können; die Tabellenangaben und Berechnungen der Refraction sind daher für den Horizont unzuverlässig, wodurch astronomische Beobachtungen am Horizont ungenau sein können. Man baut deßhalb die Sternwarten nicht mehr als hohe Thürme und gewinnt hierdurch die Möglichkeit, die Instrumente fester fundamentiren zu können und von äußeren Erschütterungen weniger gestört zu werden. Da die Luftschichten bei normalem Zustande der Luft allmälig an Dichte zunehmen, so geschieht auch die Ablenkung des Lichtstrahles allmälig; er wird in der Luft zu einer krummen Linie, deren Tangente an den letzten Punkt die Richtung gibt, in der das Auge den Himmelskörper sieht. — In Folge der terrestrischen Strahlenbrechung erscheinen auch hohe, ferne irdische Körper höher, was bei geometrischen Höhenmessungen beachtet werden muß; hierdurch ist es wohl möglich, daß bei besonderen Luftzuständen Gegenstände sichtbar werden, die sonst hinter dem Horizont liegen; so sieht man manchmal bei Hastings die 12 Meilen entfernte französische Küste, bei Reggio die sicilianische Küste mit Theilen von Messina; da aber jene abnormen Luftzustände rasch wechseln, so sind auch solche Erscheinungen raschem, zauberhaftem Wechsel unterworfen; man schrieb sie deßhalb einer Fee, der Fata Morgana zu und bezeichnet jetzt häufig derartige Erscheinungen allgemein mit demselben Namen; an den norddeutschen Meeren bezeichnet man das Erscheinen sonst unsichtbarer Küsten mit dem Namen Kimmung. Vermöge der Strahlenbrechung sieht man von erhöhten Standpunkten den Horizont um $^1/_{12}$ erweitert. — Auch das Funkeln oder Zittern der Fixsterne scheint seinen Grund in der Brechung zu haben, ähnlich wie das Zittern von Gegenständen in erhitzter Luft. Die Luft ist nämlich auf der langen Strecke zwischen unserem Auge und den Punkten, wo wagrechte Linien die Luftgrenze schneiden, häufigen Bewegungen und anderen Wechseln unterworfen, die kleine Aenderungen der Dichtigkeit herbeiführen können; daher wird ein durch diese Horizontluftschichten gehender Strahl häufige Richtungsänderungen erleiden. Da nun die Fixsterne, die bekanntlich durch ein Fernrohr nur als Punkte erscheinen, nur ein sehr dünnes Lichtbündel, fast nur einen Strahl in das Auge senden, so erhält der leuchtende Punkt durch eine stete Richtungsänderung des Strahles jeden Augenblick eine Ortsveränderung: das Fixsternlicht zittert und funkelt. Bei den Planeten aber, die durch ein Fernrohr als leuchtende Scheiben erscheinen, übertrifft der Durchmesser die durch die Brechung erzeugte Ortsveränderung einzelner Stellen: die Planeten haben ruhiges Licht. Das Funkeln der Sterne ist am Horizont am stärksten und nimmt nach dem Zenith hin immer mehr ab. — Auch das selten beobachtete Schwanken von Sternen ist wohl einer abnormen Lichtbrechung zuzuschreiben.

Die totale Reflexion. Unter der totalen Reflexion versteht man die Erscheinung, daß sehr schief an der Grenzfläche eines dünneren Mediums anlangende Lichtstrahlen nicht in dasselbe eindringen, sondern sämmtlich in das dichtere Medium zurückgeworfen werden. Damit dies stattfinde, muß der Einfallswinkel eine gewisse Größe erreichen, die von der Beschaffenheit der beiden Medien abhängt, und die man den Grenzwinkel der totalen Reflexion nennt. Für denselben besteht folgendes Gesetz: **Der Sinus des Grenzwinkels der totalen Reflexion ist gleich dem Brechungsexponenten.** 299

Fig. 166.



Beweis. Bei dem Uebergange von Lichtstrahlen aus einem dichteren in ein dünneres Medium werden die Strahlen vom Lothe gebrochen, der Brechungswinkel ist größer als der Einfallswinkel. Wenn wir also in Gedanken den Einfallswinkel immer größer werden lassen (Fig. 166), so entfernen sich die gebrochenen, in das dünnere Medium übertretenden Strahlen immer weiter von dem Lothe und nähern sich dadurch immer mehr der Grenzfläche. Bei einer gewissen Größe des Einfallswinkels wird der gebrochene Strahl gerade in die Grenzfläche fallen; dies ist der Fall, wenn der Brechungswinkel $\beta = 90°$ ist. Für

welchen Einfallswinkel aber $\beta = 90^0$ wird, erfahren wir leicht, wenn wir in der Formel des Brechungsgesetzes $\beta = 90^0$, also $\sin \beta = 1$ setzen: es ergibt sich dann $\sin \alpha : 1 = n$, oder $\sin \alpha = n$. Wenn also der Sinus des Einfallswinkels $= n$ ist, so streift der gebrochene Strahl gerade über die Grenzfläche hin: wird der Einfallswinkel noch größer, so wird der Sinus des Brechungswinkels größer als 1, was unmöglich ist; d. h. die Strahlen gehen nicht in das dünnere Medium über, sie werden an der Grenzfläche sämmtlich in das dichtere Medium reflectirt; folglich bildet der Einfallswinkel, dessen Sinus $= n$ ist, den Grenzwinkel der totalen Reflexion. Für den Uebergang aus Wasser in Luft ist $n = \frac{3}{4}$, also der Grenzwinkel $= 48^0\,35'$; für Alkohol ist derselbe $= 47^0$, für Benzol 42^0, für Crownglas 41^0, für Flintglas 38^0, für Schwefelkohlenstoff 37^0, für Diamant 24^0.

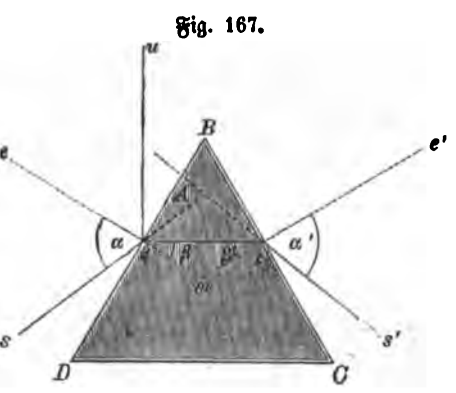
Weil bei der totalen Reflexion kein Lichtverlust durch Absorption oder durchgehendes Licht entsteht, so erzeugt dieselbe den lebhaftesten Glanz. Ein halb mit Wasser gefülltes und in Wasser getauchtes Probirgläschen glänzt an dem nicht gefüllten Theile wie Quecksilber; Luftblasen in Wasser glänzen wie Perlen, Sprünge in durchsichtigen Körpern glänzen wie Silberstreifen, weil hier bei dem Uebergange in die Luft der Blase oder der Sprünge die schiefen Strahlen sämmtlich reflectirt werden. Auch der Glanz von durchsichtigen, mit ebenen Flächen versehenen Körpern, wie z. B. der Stücke von Glaslüstern, rührt von der totalen Reflexion her; dieser Glanz tritt um so leichter und häufiger ein, je kleiner der Grenzwinkel ist; Diamant glänzt daher am stärksten. Ein Papierstreifen, den man auf die Seitenfläche eines gefüllten Glasgefäßes nahe unter den Wasserspiegel klebt, ist von manchen Stellen von oben unsichtbar, kann aber von unten, wenn man gegen den Wasserspiegel blickt, oberhalb desselben gesehen werden. Wenn ein viereckiges Blechkästchen oben halb geschlossen ist, so verschwindet ein dreieckiges Glasfensterchen, das ziemlich nahe unter der Decke angebracht ist, für ein von oben hereinblickendes Auge vollständig, wenn man das Kästchen mit Wasser füllt; dagegen erscheint es durch ein tieferes Glasfensterchen in der gegenüberliegenden Wand gesehen hoch über dem Wasserspiegel. — Benzol bildet auf Wasser eine glitzernde, Wasser auf Schwefelkohlenstoff eine kaum wahrnehmbare Grenzfläche. — Kleine Theile durchsichtiger Körper geben eine undurchsichtige Masse, wenn sie mit einem Stoffe gemengt sind, gegen welchen sie totale Reflexion besitzen. Gepulverter Bergkrystall gibt weißen Sand, Schaum besteht aus lauter durchsichtigen Häutchen, ist aber undurchsichtig, gestoßenes Glas gibt weißes Pulver, Schnee und Wolken erscheinen weiß trotz der farblosen Durchsichtigkeit ihrer Theilchen u. s. w.; in allen solchen Fällen muß das Licht oft aus dem dichten Medium in die dünne, die Zwischenräume erfüllende Luft übergehen, wobei es total reflectirt wird; werden dagegen die Zwischenräume mit einer gleich stark lichtbrechenden Flüssigkeit, also z. B. mit einem klaren Oele erfüllt, so hört der Grund der Undurchsichtigkeit auf; dann erscheint Glaspulver, weißer Sand, ein durch Rauhigkeit der Oberfläche undurchsichtiger Edelstein wieder durchsichtig; hierauf beruht wohl auch das Durchsichtigwerden von Hydrophan in Wasser. Manche erklären die Undurchsichtigkeit überhaupt für eine Wirkung der totalen Reflexion. — An den Aquarien hat man Gelegenheit, die schöne Wirkung der totalen Reflexion zu beobachten. — Ein unter Wasser befindliches Auge sieht die außerhalb des Wassers liegenden Gegenstände blos innerhalb eines Kreises, dessen Durchmesser dem Auge unter dem Grenzwinkel 48^0 erscheint.

Die totale Reflexion hat Anwendung in der Camera lucida von Wollaston (1812). Dieselbe besteht aus einem vierseitigen Prisma, von welchem zwei Seiten auf einander senkrecht und die zwei anderen unter 135^0 geneigt sind. Die eine senkrechte Seite ist den zu spiegelnden Gegenständen, die andere dem Auge zugewendet, das zugleich unter dem Prisma eine weiße Papierfläche und einen durch die Hand auf derselben geführten Zeichenstift erkennen kann. Die Strahlen der Gegenstände dringen ungebrochen durch die erste senkrechte Fläche und treffen auf die zwei schiefen Flächen in sehr schiefer Lage, werden also total reflectirt und durch die zweite senkrechte Fläche ungebrochen ins Auge gelenkt. Das Auge sieht also die Bilder der Gegenstände auf dem Papier, und die Hand kann deßhalb dieselben fixiren. In der natürlichen Magie hat die totale Reflexion an stumpfwinkligen Prismen Verwendung zu optischen Verwandlungen und zu zauberhaftem Verschwinden gefunden; indessen werden solche spiegelnde Prismen auch in mathematischen und physikalischen Präcisions-Instrumenten statt der leicht verderbenden Metallspiegel angewendet, sowie insbesondere in Leuchtthürmen, um alles nach den Seiten und nach rückwärts strahlende Licht vorwärts zu werfen. — Die totale Reflexion erklärt auch die Luftspiegelung, die Erscheinung, daß man in heißen Sandgegenden unterhalb von hochgelegenen Gegenständen ein Bild derselben wie unter einer Wasserfläche erblickt, sowie daß auf dem Meere manchmal ein umgekehrtes und über demselben wohl auch wieder ein directes Bild eines Schiffes erscheint. Bei großer Ruhe der Luft in heißen Sandgegenden kann es nämlich vorkommen, daß tiefer gelegene, heiße Luftschichten für kurze Zeit leichter und dünner sind als höhere; dann können die Strahlen eines fernen, höheren Gegenstandes diese dünneren

Luftschichten in einer den Grenzwinkel übersteigenden Richtung treffen und dadurch total reflectirt werden; da die auftreffenden Strahlen absteigend waren, so müssen die reflectirten Strahlen aufsteigen, müssen also den Eindruck eines tiefer liegenden Bildes hervorrufen, wenn sie in ein Auge gelangen. (Monge auf Napoleons Zug nach Aegypten, 1798). — Umgekehrt kann auch, und besonders auf kalten Meeren, die tiefste Luftschicht viel dichter sein als die nächst höheren; es können dann aufsteigende Strahlen tiefer liegender Gegenstände sehr schief auf den höheren dünneren Schichten eintreffen und von diesen durch totale Reflexion absteigend gemacht werden und daher ein höher liegendes Bild erzeugen. Scoresby beobachtete derartige Erscheinungen häufig in den Polarmeeren. Manche Fata Morgana und Kimmung mag ebenfalls auf Luftspiegelung beruhen.

Brechung des Lichtes durch Prismen. Unter einem Prisma versteht man in der Optik jede Einrichtung, mittels welcher ein Strahl durch einen Körper mit zwei gegen einander geneigten Flächen geht. Die häufigsten Prismen sind dreiseitig geschliffene Glasprismen; doch hat man auch solche von durchsichtigen Steinen und von Flüssigkeiten; die letzteren erhält man durch gefüllte, dreiseitig aus planparallelen Glastafeln zusammengesetzte Gefäße. Die Gerade, in welcher die Eintritts- und die Austrittsfläche eines durch ein Prisma gehenden Strahles sich schneiden, ist die brechende Kante, der Winkel dieser beiden Flächen an dieser Kante ist der brechende Winkel. Eine Ebene, die man senkrecht zur brechenden Kante durch ein Prisma legt, bildet eine Figur, die man Hauptschnitt nennt; für ein dreiseitiges, gleichseitiges Prisma ist der Hauptschnitt ein gleichseitiges Dreieck DBC (Fig. 167), in welchem der Punkt B die brechende Kante darstellt und der Winkel B den brechenden Winkel. Durch ein solches Prisma erfährt ein Lichtstrahl st eine starke Ablenkung; denn schon bei dem Eintritte zu dem Lothe et der Eintrittsfläche gebrochen, gelangt er dann zu der Austrittsfläche, deren Loth e′ t′ nicht mit dem ersten Lothe zusammenfällt, sondern mit demselben einen Winkel m, gleich dem Supplement des brechenden Winkels B einschließt; von diesem Lothe wird der Strahl nun bei dem Austritte noch weggebrochen; daher weicht der austretende Strahl t′ s′ stark in der Richtung von dem eintretenden ab. Ein Gegenstand erscheint durch ein Prisma gesehen an einer ganz anderen Stelle, und zwar geschieht die Verrückung immer nach derjenigen Richtung hin, in welcher die brechende Kante liegt, wie aus der Figur leicht zu ersehen ist. Der Winkel A, um welchen der austretende und der eintretende Strahl von einander abweichen, ist die prismatische Ablenkung. Für dieselbe bestehen folgende Gesetze:

Fig. 167.



1. Die prismatische Ablenkung eines Lichtstrahles ist gleich der Summe der Ablenkungen an beiden brechenden Flächen $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$.

2. Die Summe der zwei im Prisma befindlichen Strahlenwinkel ist constant gleich dem brechenden Winkel des Prismas, $B = \beta + \beta'$.

3. Die prismatische Ablenkung ist gleich der Summe des Einfalls- und des Austrittswinkels, vermindert um den brechenden Winkel, $A = \alpha + \alpha' - B$.

4. Das Minimum der Ablenkung findet statt, wenn der Einfalls- und der Austrittswinkel einander gleich sind (symmetrischer Durchgang).

Beweis. A ist der Außenwinkel eines Dreiecks, dessen innere Nichtnebenwinkel $\alpha - \beta$ und $\alpha' - \beta'$ sind, daher ist $A = (\alpha + \beta) + (\alpha' - \beta')$ (Beweis von 1.). Durch ver-

änderte Buchstabenstellung ist $A = \alpha + \alpha' - (\beta + \beta')$. Da nun $\beta + \beta'$ ebensowohl wie B das Supplement von m bildet, so ist $\beta + \beta' = B$ (Beweis zu 2.), woraus durch Einsetzung entsteht $A = \alpha + \alpha' - B$ (Beweis zu 3.).

Den in der letzten Zeit viel besprochenen Beweis für das Minimum der Ablenkung führen wir nach Stoll (Progr. des Gymn. zu Bensheim 1873). Idee des Beweises: Die Ablenkung A hat nach 3. ihren kleinsten Werth, wenn die Summe $\alpha + \alpha'$ ein Minimum ist; die Bedingung, unter welcher dieser Fall eintritt, läßt sich unter anderen dadurch ermitteln, daß man $\sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha')$ als Function von $\sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')$ darstellt. — Ausführung des Beweises. Nach dem Brechungsgesetze ist $\sin \alpha = n \sin \beta$ und $\sin \alpha' = n \sin \beta'$. Verbindet man diese 2 Gleichungen sowohl durch Addition als durch Subtraction, so ergibt sich durch Anwendung der Formeln für die Summe und die Differenz zweier Sinusse:

1) $\sin {}^1/_2(\alpha+\alpha') \cos {}^1/_2(\alpha-\alpha') = n \sin {}^1/_2(\beta+\beta') \cos {}^1/_2(\beta-\beta') = n \sin {}^1/_2 B \cos {}^1/_2(\beta-\beta')$

2) $\cos {}^1/_2(\alpha+\alpha') \sin {}^1/_2(\alpha-\alpha') = n \cos {}^1/_2(\beta+\beta') \sin {}^1/_2(\beta-\beta') = n \cos {}^1/_2 B \sin {}^1/_2(\beta-\beta')$

Multiplicirt man beide Seiten von 1) mit $\cos {}^1/_2 B$, diejenigen von 2) mit $\sin {}^1/_2 B$, quadrirt die so umgeformten Seiten und verbindet die neuen Gleichungen durch Addition, so erhält man:

$$[\sin {}^1/_2(\alpha + \alpha') \cos {}^1/_2(\alpha - \alpha') \cos {}^1/_2 B]^2 + [\cos {}^1/_2(\alpha + \alpha') \sin {}^1/_2(\alpha - \alpha') \sin {}^1/_2 B]^2 = [n \sin {}^1/_2 B \cos {}^1/_2 B]^2.$$

Setzt man $\cos^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha') = 1 - \sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha')$ und vereinigt die Glieder mit $\sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha')$, so wird:

$$\sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha') [\cos^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha') \cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha') \sin^2 {}^1/_2 B = \sin^2 {}^1/_2 B [n^2 \cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')].$$

Wenn jetzt auch $\cos^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha') = 1 - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')$ gesetzt wird, so entsteht:

$$\sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha') [\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')] = \sin^2 {}^1/_2 B \{[\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')] + (n^2 - 1) \cos^2 {}^1/_2 B\},$$

woraus $\sin^2 {}^1/_2(\alpha + \alpha') = \sin^2 {}^1/_2 B \left\{1 + \dfrac{(n^2 - 1) \cos^2 {}^1/_2 B}{\cos^2 {}^1/_2 B - \sin^2 {}^1/_2(\alpha - \alpha')}\right\}$

Die rechte Seite dieser Gleichung wird ein Minimum, wenn $\alpha = \alpha'$; unter der gleichen Voraussetzung tritt daher auch das Minimum der prismatischen Ablenkung ein. Zeichnet man diesen Specialwerth des Winkels α, so wie die entsprechenden anderen Größen durch den Index 0 aus, so ist

$$A_0 = 2\alpha_0 - B;\ B = 2\beta_0 \text{ und } n = \frac{\sin \alpha_0}{\sin \beta_0} = \frac{\sin {}^1/_2(A_0 + B)}{\sin {}^1/_2 B}$$

Fig. 168.

Der letzte Ausdruck ist von besonderer Wichtigkeit, da er zur Bestimmung des Brechungsexponenten dient.

Den Weg eines Strahles durch ein Prisma ergibt folgende von Radau (1863) aufgefundene geometrische Construction. In Fig. 168 ist B der brechende Winkel und a die Eintrittsstelle des Strahles. Man beschreibe um a als Mittelpunkt zwei concentrische Kreislinien, deren Radien sich wie die Lichtgeschwindigkeiten in beiden Medien verhalten, so daß $R : r = c_1 : c_2 = n : 1$; sodann verlängere man den einfallenden Strahl, bis er die kleinere Kreislinie in b trifft, fälle von b auf die erste brechende Fläche das Loth bc, das rückwärts verlängert die größere Kreislinie in d trifft, so ist nach Reusch (298.) ad die Richtung und ae der Weg des gebrochenen Strahles; denn $\sin \alpha$ (bei b) ist $ac : ab = ac : r$ und $\sin \beta$ (bei d) ist $ac : ad = ac : R$; daher $\sin \alpha : \sin \beta = (ac : r) : (ac : R) = R : r = c_1 : c_2 = n$. Fällt man nun aus d auf die zweite brechende Fläche das Loth df, das rückwärts verlängert die kleinere Kreislinie in g trifft, so ist ag die Richtung des austretenden Strahles, welcher mithin selbst erhalten wird, wenn man durch e eine Parallele zu ag zieht; denn $\sin \alpha'$ (bei g) ist $ah : ag = ah : r$ und $\sin \beta'$ (bei d) ist ah : ad

$= ah : R$; daher $\sin \alpha' : \sin \beta' = (ah : r) : (ah : R) = R : r = c_1 : c_2 = n$. Auch hier ist leicht ersichtlich, daß $B = \beta + \beta'$, da $B = bdg$ ist, und daß die prismatische Ablenkung $A = (\alpha - \beta) + (\alpha' - \beta')$, da $A = bag = bad + dag$ ist. — Wählt man ag parallel zu fe und bestimmt hiernach die anderen Punkte f, d, c, b, a, so erhält man durch Construction den kleinsten Einfallswinkel α, für welchen noch ein Austritt des Strahles aus dem Prisma möglich ist.

Es findet nämlich nicht in allen Fällen ein Durchgang des Strahles durch das Prisma statt und zwar dann nicht, wenn der Einfallswinkel des Strahles an der Austrittsfläche den Grenzwinkel der totalen Reflexion übertrifft; in diesem Falle wird der Strahl an der Austrittsfläche total reflectirt, wie z. B. bei der Camera lucida. Es sei nämlich dieser Grenzwinkel $= g$, so darf höchstens sein $\beta + g = B$ oder $\beta = B - g$. Wäre nun $B = 2g$, so müßte $\beta = g$ werden; nun wird aber der Brechungswinkel beim Eintritte in ein dichteres Medium niemals so groß, wie der Grenzwinkel für den Austritt aus demselben; folglich muß $\beta < g$, also auch $B < 2g$ sein. Der Durchgang von Strahlen durch ein Prisma findet nicht statt, wenn der brechende Winkel desselben gleich oder größer ist als der doppelte Grenzwinkel der totalen Reflexion; es findet dann an der Austrittsfläche totale Reflexion statt. Werden diese total reflectirten Strahlen durch die dritte Prismenfläche hinausgeleitet, so sieht man von dieser aus ein umgekehrtes Bild der Gegenstände; dieses Bild ist rein von Farben, wenn der Austritt senkrecht geschieht, wenn also das Prisma gleichschenklig rechtwinklig ist; um dieses Bild nicht durch andere Bilder zu trüben, bedeckt man die spiegelnde Hypotenusenfläche mit einem Rußanstrich. — Es gibt auch Fälle, in welchen der brechende Winkel sogar kleiner sein muß als der einfache Grenzwinkel. Fällt z. B. der Strahl senkrecht durch die eine Fläche eines Prismas, so ist sein Einfallswinkel gegen die zweite Fläche gerade gleich dem brechenden Winkel; folglich muß der brechende Winkel kleiner als der Grenzwinkel sein, um einen Durchgang des senkrecht auffallenden Strahles durch das Prisma zu gestatten. Aehnlich ist es, wenn der Strahl eine Richtung zwischen dem Lothe und der brechenden Kante einschlägt, wie z. B. der Strahl ut (Fig. 167). — Betrachtet man durch ein Prisma einen schmalen Gegenstand von einiger Länge, wie z. B. eine Fensterrippe, so erscheint das Bild gebogen; denn die Einfallsebenen vieler Strahlen sind dann nicht senkrecht zur Achse, fallen also nicht in den Hauptschnitt, sondern in andere Schnitte des Prismas. Für diese ist aber der brechende Winkel B kleiner und daher die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B$ stärker.

Von Interesse sind einige Berechnungen Bauers, da sich aus denselben über den scheinbaren Ort eines jenseits und innerhalb eines dichteren Mediums befindlichen Körpers Zahlenresultate ergaben, welche frühere unbestimmte Angaben präcisirten. Die erste Rechnung (1867) bezieht sich auf die Verschiebung eines Lichtstrahles durch eine planparallele Platte (298. 7). Für eine solche Platte (Fig. 169) ist $\beta' = \beta$ (strenggenommen $= -\beta$, so daß $B = \beta + \beta' = 0$) und $\alpha' = \alpha$ (strenggenommen $= -\alpha$), so daß die Ablenkung $A = \alpha + \alpha' - B = 0$). Die Verschiebung, d. i. der senkrechte Abstand v der Richtung des austretenden von der des eintretenden Strahles ist $v = (d : \cos \beta') . \sin (\alpha' \quad \beta') = (d : \cos \beta) \sin (\alpha - \beta) = d \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{n \cos \beta}\right) = d \sin \beta \left(n - \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}\right)$

Fig. 169.

Setzt man jetzt $n \cos \beta = \sqrt{(n^2 - \sin^2 \alpha)} = \sqrt{[n^2 \cos^2 \alpha + (n^2 - 1) \sin^2 \alpha]}$ und
$\cos \alpha = \sqrt{(1 - n^2 \sin^2 \beta)} = \sqrt{[\cos^2 \beta - (n^2 - 1) \sin^2 \beta]}$, so wird

$$v = d \sin \alpha \{1 - 1 : \sqrt{[n^2 + (n^2 - 1) \tang^2 \alpha]}\} = d \sin \beta \{n - \sqrt{[1 - (n^2 - 1) \tang^2 \beta]}\}$$

Hieraus ist klar zu erkennen, daß v gleichzeitig mit d, α, β und n wächst. Tritt der Strahl streifend ein und aus, so wird die Verschiebung selbstverständlich gleich der Dicke der Platte; die erhaltenen Formeln geben gleichfalls diese Maximalverschiebung durch die Substitution: $\alpha = 90^0$, $\beta = g$ (Grenzwinkel der totalen Reflexion), wobei zu beachten, daß $\sin g = 1 : n$ und $\tang g = 1 : \sqrt{(n^2 - 1)}$.

Die zweite Berechnung (1874) bezieht sich auf die Verschiebung eines Körpers, der sich im Inneren eines durchsichtigen Mediums, z. B. in Wasser befindet. Die Rechnung kann mit elementaren Mitteln nicht stattfinden; wir wollen daher nur die Resultate an-

führen. Ist der wirkliche Abstand des leuchtenden Punktes von der Grenzfläche der beiden Medien = h, so ist der scheinbare Abstand $x = (h : n) \{1 - (n^2 - 1) \tang^2 \beta\}^{3/2}$, und die dieser Fläche parallele Verschiebung $y = h (n^2 - 1) \tang^3 \beta$. Die beiden Verschiebungen sind hiernach direct proportional dem wirklichen Abstande, wachsen beide mit dem Einfallswinkel und dem Brechungsexponenten und zwar sind sie von der Function $n^2 - 1$, die auch in der obigen Rechnung vorkommt und die man brechende Kraft nennt, abhängig. Beide Verschiebungen bewirken eine scheinbare Annäherung des Gegenstandes an das Auge. Befindet sich das Auge senkrecht über der Grenzfläche, so hat β und daher auch jede der beiden Verschiebungen ihren Minimalwerth, die parallele Verschiebung ist = 0, die normale $(1 - 1/n)\,h$; befindet sich z. B. ein Auge senkrecht über einem Körper im Wasser, so beträgt die senkrechte Annäherung $1/4\,h$. Befindet sich das Auge in der Grenzfläche, so finden die Maximalwerthe statt; β ist dann gleich dem Grenzwinkel g der totalen Reflexion, die normale Verschiebung ist = h und die parallele = h tang g. Befindet sich also ein Auge in gleicher Höhe mit einer Wasseroberfläche, so erscheint jeder tiefere Gegenstand ebenfalls in derselben und zwar an der genäherten Stelle, an welcher der Strahl unter dem Grenzwinkel einfällt.

301 **Bestimmung des Brechungsexponenten** (Fraunhofer 1814). Die Brechung des Lichtes durch ein Prisma macht eine genaue Bestimmung des Brechungsexponenten möglich; denn für den Fall der kleinsten Ablenkung fanden wir in 300.

$$n = \sin \tfrac{1}{2} (A_0 + B) : \sin \tfrac{1}{2} B.$$

Mittels dieser Formel ist es möglich, den Brechungsexponent n für einen Körper zu bestimmen, wenn man denselben in prismatische Form bringen, den brechenden Winkel B des Prismas und das Minimum der Ablenkung A_0 eines Lichtstrahles messen kann.

Flüssige Körper lassen sich leicht in prismatische Form bringen, indem man sie in ein prismatisches Gefäß, aus planparallelen Glasplatten gebildet, einfüllt. Feste Körper haben häufig von Natur prismatische Gestalt oder lassen sich in dieselbe zuschleifen; sind sie dafür zu kostbar wie z. B. Edelsteine, so bringt man sie in ein flüssiges Prisma und mischt demselben so lange eine andere Flüssigkeit zu, bis die Mischung denselben Brechungsexponent hat wie der feste Körper, was man daran erkennt, daß der feste Körper in der Flüssigkeit verschwindet; für Edelsteine benutzt man z. B. Olivenöl, dem man allmälig Cassia- oder Sassafras-Oel zumischt, weil diese Oele einen sehr hohen Brechungsexponent haben; hierdurch kann man, beiläufig gesagt, auch falsche Diamanten von echten unterscheiden. Auch luftförmige Körper füllt man in prismatische Glasgefäße oder in weite Röhren, deren Enden schief gegen einander abgeschliffen und durch Glasplatten geschlossen sind. — Den brechenden Winkel der Prismen mißt man mittels des Anlege-Goniometers oder mittels Wollastons Reflexionsgoniometer. Das Minimum der Ablenkung maß Fraunhofer mittels eines Theodoliten, vor dessen Fernrohr eine drehbare Scheibe angebracht war zum Aufstellen und Drehen des Prismas. Zuerst wurde das Fernrohr so gestellt, daß der Strahl das Fadenkreuz traf; dann wurde das Prisma auf die Scheibe gebracht, und diese und das Fernrohr so lange gedreht, bis der Strahl wieder auf das Fadenkreuz fiel und am wenigsten von der ursprünglichen Lage abgelenkt erschien. Da indeß bei dem Gange durch das Prisma der Strahl in seine Farben zerlegt wird und dadurch in einen breiten Farbenstreifen, in ein Spectrum, ausgebreitet ist, so muß das Fernrohr auf eine bestimmte Stelle des Spectrums gerichtet werden; die gewöhnlichen mittleren Angaben beziehen sich auf den gelben Theil des Spectrums, die genauen auf ganz bestimmte, scharfe dunkle Linie desselben, die wir später noch betrachten werden. Genauer und bequemer können diese Messungen mit Babinets Goniometer und mit Meyersteins Spectrometer vorgenommen werden, weil bei diesen Apparaten das Prisma unabhängig von dem Fernrohre in der Mitte des getheilten Kreises drehbar aufgestellt ist. — Nach dieser Methode bestimmt man hauptsächlich die Brechungsexponenten für den Uebergang aus der Luft in andere Körper; wollte man denselben auffinden für den Lichtübergang aus einem beliebigen Körper in einen anderen, so hätte man den leicht zu beweisenden Satz anzuwenden, daß der Brechungsexponent zweier Körper gegen einander gleich dem Quotienten der Brechungsexponenten der beiden Körper gegen einen und denselben dritten ist; so ergibt sich z. B. der Brechungsexponent von Wasser gegen Glas $= 4/3 : 3/2 = 8/9$, weil $4/3$ und $3/2$ die Exponenten von Wasser und Glas gegen Luft sind. Diesen Satz benutzt man auch, um die Brechungsexponenten von Körpern gegen den leeren Raum, die sogenannten absoluten Brechungsexponenten zu finden; man hat einfach den Exponent des Körpers gegen die Luft mit demjenigen der Luft gegen den leeren Raum zu multipliciren. Folglich ist es von großem Interesse, den Exponent der Luft gegen den leeren Raum, den absoluten

Brechungsexponent der Luft zu bestimmen. Derselbe ist bei 0° und 76cm Luftdruck = 1,000 294, welche Zahl sowohl von Arago und Biot (1806) aus physikalischen Rechnungen, wie auch von Delambre aus der astronomischen Refraction gefunden wurde. Die folgende Tabelle enthält die nach den angegebenen Methoden aufgesuchten Brechungsexponenten fester und flüssiger Körper gegen die Luft und die absoluten Brechungsexponenten von Gasen:

Bleichromat	2,926	Steinöl	1,544
Anatas	2,508	Sassafrasöl	1,536
Diamant	2,487	Leinöl	1,485
Zinkblende	2,260	Naphta	1,475
Phosphor	2,224	Olivenöl	1,469
Schwefel	2,040	Schwefelsäure	1,440
Flintglas	2—1,6	Salpetersäure	1,410
Calomel	1,970	Salzsäure	1,401
Wismuthnitrat	1,890	Salmiaklösung	1,393
Granat	1,815	Kalilauge	1,390
Rubin	1,779	Kochsalzlösung	1,375
Saphir	1,768	Weingeist	1,370
Turmalin	1,668	Rum	1,360
Kalkspath	1,654	Aether	1,358
Barytspath	1,647	Ammoniak	1,349
Topas	1,638	Essig	1,347
Bergkrystall	1,562	Brunnenwasser	1,337
Copal	1,549	Wasser	1,336
Zucker	1,545		
Crownglas	1,540	Cyan	1,000 834
Gemeines Glas	1,530	Chlor	1,000 772
Salpeter	1,514	Elayl	1,000 678
Alaun	1,457	Schwefelkohlenstoff	1,000 644
Augenlinsen	1,384	Stickoxydul	1,000 503
Eis	1,310	Kohlendioxyd	1,000 449
		Sumpfgas	1,000 443
Schwefelkohlenstoff	1,680	Kohlenoxyd	1,000 340
Cassia-Oel	1,640	Stickoxyd	1,000 303
Anis-Oel	1,601	Stickstoff	1,000 300
Tolubalsam	1,628	Atm. Luft	1,000 294
Canadabalsam	1,532	Sauerstoff	1,000 272
Copaivabalsam	1,528	Wasserstoff	1,000 138

Es ist aus dieser Tabelle ersichtlich, wie weit die Brechungsgesetze 5 und 6 gelten. Die Gase haben viel kleinere Brechungsexponenten als die Flüssigkeiten, und die Flüssigkeiten durchschnittlich kleinere als die festen Körper; die festen Körper brechen also das Licht stärker als die flüssigen, und beide sind hierin weit den Luftarten überlegen. Auch hat die leichteste Luftart den kleinsten Brechungsexponenten, schwere und dichte feste Körper wie die Edelsteine, haben die größten Brechungsexponenten. Wenn hieraus bei oberflächlicher Betrachtung der Schluß gezogen werden könnte, daß der Brechungsexponent mit der Dichte wachse, so fallen doch sogleich zahlreiche Ausnahmen in's Auge; denn die ganze Reihe der brennbaren Flüssigkeiten, die durchschnittlich leichter als nicht brennbare sind, haben größere Brechungsexponenten als diese, und selbst der Spiritus und der Aether überragen hierin das schwerere Wasser; ja jene brennbaren Oele brechen sogar stärker als viel dichtere feste Körper. Aber auch bei nicht brennbaren Körpern steht der Brechungsexponent durchaus nicht in irgend einem festen Verhältnisse zu der Dichte, Kalkspath bricht stärker als Barytspath, Stickstoff stärker als Sauerstoff. Der Brechungsexponent ändert sich also sehr unregelmäßig mit der Dichte. Dies findet aber nicht blos für verschiedene Körper, sondern auch für einen und denselben Körper statt. Wird ein Körper erwärmt und dadurch weniger dicht, so nimmt zwar sein Brechungsexponent ab; im Allgemeinen nimmt aber bei steigender Temperatur der Brechungsexponent rascher ab als die Dichtigkeit; doch gibt es auch Fälle, wo die Abnahmen der Brechungsexponenten und der Dichtigkeit einander proportional sind, und wo die Brechungsexponenten langsamer abnehmen als die Dichtigkeiten. Ebenso wächst bei den Salzlösungen der Brechungsexponent zwar mit der Concentration, aber ohne der Dichtigkeit proportional zu sein. Wenn nun der Brechungsexponent nicht in einfachem Verhältnisse zu der Dichte steht, so liegt die Vermuthung nahe, daß er mit der materiellen Verschiedenheit der Körper, mit der Einwirkung von Aether und Körperstoff auf einander, in Zusammenhang sei; man hat daher in früherer, wie in neuester Zeit mit Hilfe des Brechungsexponenten in das Geheimniß der Stoffverschiedenheit einzudringen

gesucht und zu dem Zwecke verschiedene Functionen des Brechungsexponenten näherer Forschung unterworfen, welche in letzter Zeit zu interessanten Ergebnissen geführt hat, die wir noch etwas eingehender erörtern wollen.

302 **Die brechende Kraft.** Das Refractions-Aequivalent. Unter der brechenden Kraft versteht man das um 1 verminderte Quadrat des Brechungsexponenten, also $n^2 - 1$. Man wählte diese Function des Brechungsexponenten, da dieselbe häufig in optischen Rechnungen (s. z. B. 300) auftritt. Obwohl dieser Ausdruck noch aus der Emissionshypothese herrührt, so ist er doch in die Undulationstheorie in derselben Bedeutung übergegangen; denn er bedeutet, da $n^2 - 1 = (c : c')^2 - 1 = (c^2 - c'^2) : c'^2 = (mc^2 - mc'^2) : mc'^2$ ist, das Verhältniß des Verlustes an lebendiger Kraft bei dem Eintritte in ein neues Medium zu der noch zurückbleibenden lebendigen Kraft, und kann daher als ein Maß der Wirkung des neuen Mediums auf die Lichtbewegung, als ein Maß der brechenden Kraft angesehen werden. Indessen macht man hierbei die Voraussetzung, daß in dem neuen Medium die schwingende Masse m dieselbe sei wie in dem alten, eine Voraussetzung, die keine Berechtigung hat; man macht weiter die Voraussetzung, daß ein Verlust an lebendiger Kraft stattfinde, was dem Gesetze der Erhaltung der Kraft widerspricht, wenn man nicht eine Lichtabsorption ungerechtfertigter Weise mit der Brechung in Zusammenhang bringen will. Demnach entspricht der Name brechende Kraft für den Ausdruck $n^2 - 1$ der Wissenschaft nicht mehr, und kann höchstens als ein Maß für die größere Dichte oder Masse des Aethers angesehen werden; denn damit nach dem Gesetze der Erhaltung der Kraft die lebendige Kraft der Lichtbewegung in dem neuen Medium gleich derjenigen in dem alten sei, muß die Masse in demselben Maße größer werden, als das Quadrat der Geschwindigkeit kleiner wurde, also in dem Maße $c^2 : c'^2$; die Masse des Aethers in dem neuen Medium muß demnach sein $mc^2 : c'^2$: sie hat daher zugenommen um $(mc^2 : c'^2) - m = (mc^2 - mc'^2) : c'^2 = (n^2 - 1)\,m$. Demnach gibt die brechende Kraft nach der Undulationstheorie nur die Zunahme der Dichte des Aethers in einem brechenden Medium an. Es ist daher schon von vornherein undenkbar, daß Untersuchungen über die brechende Kraft zu einem wesentlichen Resultate führen sollten. Und wirklich ergeben die Rechnungen und Beobachtungen, daß bei festen und flüssigen Körpern die brechende Kraft weder mit der Dichte, noch mit der Temperatur, noch mit der mechanischen oder chemischen Zusammensetzung in irgend einem einfachen Verhältnisse steht. Für die Gase haben zwar Arago und Biot (1806) gefunden, daß die brechende Kraft eines und desselben Gases der Dichte desselben proportional, daß also der Quotient $(n^2 - 1) : d$, den man die specifische brechende Kraft nannte, für ein und dasselbe Gas constant ist, und daß die brechende Kraft eines Gasgemisches gleich der Summe der brechenden Kräfte seiner Bestandtheile ist; allein Dulong hat bald darauf gezeigt, daß die brechenden Kräfte verschiedener Gase in keiner Beziehung zur Dichte stehen, und daß die brechende Kraft einer chemischen Verbindung durchaus nicht gleich der Summe der brechenden Kräfte der Bestandtheile ist. Weil also der ältere Begriff der brechenden Kraft wenig Resultate ergab, so haben nach dem Vorschlage Beers neuere Physiker, Landolt (1864) und Gladstone (1864) versucht, statt derselben den Ausdruck $(n - 1) : d$ als Ausgangspunkt zu nehmen. Landolt nennt diesen Ausdruck das specifische Brechungsvermögen. Derselbe gibt offenbar ein Urtheil über die brechende Einwirkung eines Mediums; denn $n - 1 = (c - c') : c'$ bedeutet den Verlust, den die Geschwindigkeit des Lichtes im Verhältnisse zu der zurückbleibenden Geschwindigkeit in dem neuen Medium erfährt. Wenn nun auch Rühlmann (1868) und Wüllner (1869) Veränderungen des specifischen Brechungsvermögens mit der Temperatur beobachtet haben, so sind dieselben doch so verschwindend klein, daß sich für dieses Vermögen die höchst interessanten Sätze ergeben, daß dasselbe unabhängig von der Temperatur und dem Aggregatzustande ist, also für einen und denselben Körper unter allen Umständen constant bleibt, ja sogar in den verschiedensten Mischungen und chemischen Verbindungen seinen Werth behält, so daß isomere Verbindungen dasselbe specifische Brechungsvermögen haben. Dadurch ist der Begriff des Refractionsäquivalentes entstanden. Das Refractionsäquivalent ist das specifische Brechungsvermögen des chemischen Atomgewichtes oder nach früherer Bezeichnung Aequivalentes eines Stoffes, also $= p\,(n - 1) : d$, wenn p das chemische Atomgewicht bedeutet. Für diesen neuen Begriff ergab sich der Satz: das Refractionsäquivalent einer chemischen Verbindung ist gleich der Summe der Refractionsäquivalente seiner Bestandtheile. Durch diesen Satz ist es möglich, das Refractionsäquivalent und daher auch den Brechungsexponent einer Verbindung zu finden, wenn man die Exponenten der Bestandtheile kennt; umgekehrt kann man das Brechungsäquivalent und daher den Brechungsexponent eines Bestandtheils finden, wenn die Brechungsäquivalente der Verbindung und der übrigen Bestandtheile bekannt sind. Hierdurch ist es gelungen, nicht nur die Refractionsäquivalente der Elemente zu bestimmen, sondern sogar die Brechungsexponenten der undurchsichtigen Metalle. Landolt und Haagen fanden überein-

stimmend das Refractionsäquivalent von Wasserstoff = 1,3, von Sauerstoff = 3, von Kohlenstoff = 5. — Schrauf, der von der Idee ausgeht, daß das Licht nicht aus Schwingungen des Aethers, sondern der Körperatome bestehe, findet doch so ziemlich dieselben Zahlen. Gladstone berechnete die Brechungsäquivalente einer Reihe von Metallen und fand z. B. für Kalium 8, für Calcium 5,2, für Zink 4,8, für Blei 12,1, für Quecksilber 9,8, woraus sich die Brechungsvermögen und die Brechungsexponenten dieser Stoffe berechnen lassen. — Schrauf blieb bei der älteren Definition für die spec. brechende Kraft $(n^2 - 1):d$, setzte für dieselbe ähnliche Sätze voraus, wie sie für das spec. Brechungsvermögen gelten und berechnete auf Grund derselben die Refractions-Aequivalente. Außerdem fand er eine Gleichung, in welcher das Refr.-Aeq. mit Hilfe des Productes aus der Zahl und Größe der Atome in der Masseneinheit ausgedrückt ist, und konnte daher dieses Product, das er optische Atomzahl nannte, mit Hilfe der berechneten Refractions-Aequivalente bestimmen; aus der optischen Atomzahl suchte er nun die Krystallformen der Körper abzuleiten. Schraufs Folgerungen haben wegen der Unsicherheit ihrer Grundlagen bis jetzt wenig Anerkennung gefunden; doch ist derselbe auf diesem neuen Gebiete offenbar am weitesten vorgedrungen. —

Brechung des Lichtes durch Linsen. Ein Prisma geht in eine Linse über, wenn die Richtung einer oder zweier Seitenflächen sich fortwährend und stetig ändert. Es entstehen dann durchsichtige Körper, welche eine oder zwei gekrümmte Seitenflächen haben, und solche Körper nennt man eben Linsen. Man unterscheidet sechs Arten von Linsen, deren Unterschiede leicht an den Durchschnittsformen (Fig. 170) zu erkennen sind: 1. die biconvexe Linse; 2. die planconvexe **303**

Fig. 170.

1 2 3 4 5 6

M

Linse; 3. die concavconvexe Linse; diese drei Arten nennt man auch Sammellinsen oder Brenngläser; sie sind in der Mitte dicker als am Rande; 4. die biconcave Linse; 5. die planconcave Linse; 6. die convexconcave Linse; diese drei Arten nennt man auch Zerstreuungslinsen; sie sind in der Mitte dünner als am Rande. Die Krümmung der Linsen kann nach jeder beliebigen Curve stattfinden; doch ist für Linsen mit Kugelflächen sowohl die Anfertigung, als auch die Auffindung und die Gestalt der Gesetze am einfachsten. Eine Gerade, welche von dem geometrischen Mittelpunkte der einen Grenzfläche nach demjenigen der anderen geht oder auf diese senkrecht gefällt wird, heißt Achse der Linse. Fallen die Achsen mehrerer Linsen zusammen, so nennt man sie centrirt; eine einzige Linse ist centrirt, wenn die Achse auf einem Grenzkreise senkrecht steht. Der Mittelpunkt M des in die Linse fallenden Theiles der Achse wird bei biconvexen und biconcaven Linsen von beiderseits gleicher Krümmung der optische Mittelpunkt genannt; bei solchen Linsen gehen alle durch diesen Punkt gezogenen Strahlen ungebrochen durch, weil diejenigen Flächenelemente, welche ihre Eintritts- und Austrittsfläche bilden, einander parallel sind; solche Strahlen werden Hauptstrahlen genannt; der Hauptstrahl, der in die Achse fällt, geht bei allen Linsen ungebrochen durch. Die anderen Strahlen werden sämmtlich gebrochen und zwar um so mehr, je größer ihr Einfallswinkel ist. Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, vereinigen sich im

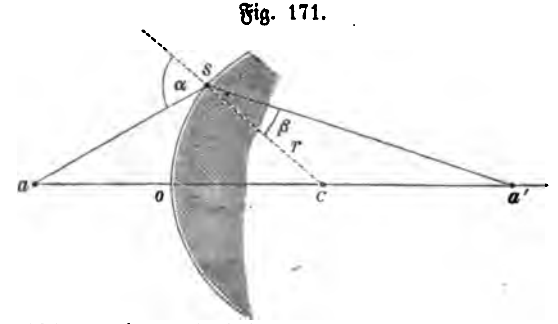
Allgemeinen nicht wieder in einem Punkte; nur Strahlen, die ringsum gleich gegen die Achse gelagert sind, und solche Strahlen, die nahe bei der Achse auftreffen, werden in einem Punkte vereinigt, erzeugen also ein Bild des Lichtpunktes, von dem sie ausgehen. Den Abstand d des leuchtenden Punktes von der Linse nennt man die Gegenstandsweite, den Abstand b des Bildes die Bildweite. Für diese Abstände gilt folgendes Gesetz:

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = (n - 1)\left\{\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (42)$$

Hierin bedeutet n den Brechungsexponent, r und r' die Radien der beiden Kugelflächen. Das Gesetz wird gewöhnlich in Gestalt der mathematischen Formel ausgedrückt und benutzt; indeß läßt sich dasselbe auch mit Worten aussprechen: **Die Summe der reciproken Bildweite und der reciproken Gegenstandsweite ist gleich der Summe der reciproken Radien multiplicirt mit dem um 1 verminderten Brechungsexponent.**

Beweis. Zum Zwecke des Beweises betrachten wir zuerst die Brechung von Strahlen, die in ein durchsichtiges, dichteres Medium mit Kugeloberfläche eindringen (Fig. 171). Wenn c der Mittelpunkt und a der leuchtende Punkt ist, so ist ac die Achse und ein Hauptstrahl; der Strahl as, welcher in der Ebene des Papiers auf die Kugelfläche fällt, wird in derselben Ebene zum Lothe sc gebrochen, kann also die Achse in einem Punkte a' schneiden. Die Lage dieses Punktes ergibt sich aus folgender Betrachtung: die beiden Winkel α und β stehen bekanntlich in einem gesetzmäßigen Zusammenhange, der durch die Gleichung $n = \sin\alpha : \sin\beta$ ausgedrückt ist; für dieselben zwei Winkel lassen sich noch mehr Gleichungen in den Dreiecken asc und a'sc auffinden; denn $ac : sc = \sin(180 - \alpha) : \sin sac$, woraus $\sin\alpha = (ac : sc) \sin sac$, und ebenso $a'c : sc = \sin\beta : \sin sa'c$, woraus $\sin\beta = (a'c : sc) \sin sa'c$. Durch Division der beiden Werthe und mit Rücksicht auf die erste Gleichung ergibt sich $n = (ac : a'c)(\sin sac : \sin sa'c)$. Da nun $\sin sac : \sin sa'c = a's : as$, so ist auch $n = (ac : a'c)(a's : as)$. Machen wir nun die wohl zu beachtende Voraussetzung, daß die Strahlen nahe bei der Achse auffallen, daß also nur centrale Strahlen, nicht aber die Randstrahlen durch die Linse gehen können, so ist das letzte Verhältniß $a's : as$ nahezu $= a'o : ao = u : d$, wenn wir mit u die Entfernung a'o des Vereinigungspunktes der gebrochenen Strahlen von der Oberfläche bezeichnen; ebenso ist das erste Verhältniß $ac : a'c = (d + r) : (u - r)$. Setzen wir diese beiden Werthe in den Ausdruck für n ein, so folgt $n = [(d + r) : (u - r)] . (u : d)$. Schafft man hierin die Nenner weg und dividirt die entstehende Gleichung durch bdr, so erhält man $n/r - n/u = 1/r + 1/d$ oder $n/u + 1/d = n/r - 1/r$. Diese Gleichung spricht aus, daß alle centralen Strahlen, die von einem Punkte ausgehen, auch in einem Punkte vereinigt werden; denn für alle diese Strahlen haben d, r und n dieselben Werthe; für alle Strahlen ergibt sich auch derselbe Werth von u; dagegen erhalten die Randstrahlen, weil für dieselben d immer größer wird, andere und zwar kleinere Werthe von u, die Randstrahlen haben daher näher liegende Vereinigungspunkte.

Fig. 171.



Wenn wir nun von dem einerseits kugelförmig begrenzten Medium zu der Linse d. i. zu einem beiderseits kugelförmig begrenzten Körper übergehen, so haben wir zu beachten, daß bei dem Austritte der Strahlen eine abermalige Brechung stattfindet, daß also unsere für u gefundene Gleichung abermals zur Geltung kommt, aber mit einigen Modificationen: 1. Die Brechung findet für den Uebergang aus dem dichteren Medium in die Luft statt: also ist $1/n$ für n zu setzen. 2. Die Krümmung der Austrittsfläche kann eine andere sein, und der Radius derselben hat die entgegengesetzte Lage; also ist $-r'$ für r zu setzen. 3. Der Vereinigungspunkt der aus dieser zweiten Fläche tretenden Strahlen erzeugt das Bild; also ist b für u zu setzen. 4. Die Strahlen, welche auf diese Fläche fallen, kommen nicht von a, sondern fallen so ein, als ob sie von a' kämen, dessen Abstand von der Aus-

trittsfläche $= u - \delta$ ist, wenn δ die Dicke der Linse bedeutet; da aber diese Entfernung in entgegengesetzter Richtung wie d gerechnet wird, so ist $-(u - \delta)$ für d zu setzen, und, wenn wir die Dicke der Linse außer Acht lassen, $- u$ für d. Nehmen wir diese Substitutionen vor, so erhalten wir die für den Austritt geltende Gleichung $1/bn - 1/u = - 1/r'n + 1/r'$. Nehmen wir hieraus den Werth für $1/u$ und setzen denselben in die ebenfalls hier gültige Eintrittsgleichung ein, so ergibt sich $n/bn + n/r'n - n/r' + 1/d = n/r - 1/r$, woraus endlich folgt $1/b + 1/d = n/r + n/r' - 1/r - 1/r'$ oder $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$, was zu beweisen war.

Sind die einfallenden Strahlen einander parallel, so muß in der Formel $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$ die Gegenstandsweite $d = \infty$, also $1/d = 0$ gesetzt werden, wodurch sich ergibt $1/b = (n - 1)(1/r + 1/r')$; die parallelen Strahlen werden also in einem Punkte vereinigt, dessen Entfernung gleich dem reciproken Werthe von $(n - 1)(1/r + 1/r')$ ist; wir nennen auch hier diesen Punkt Brennpunkt (F) und seine Entfernung von der Linse Brennweite $= f$; führen wir den reciproken Werth derselben an Stelle des Ausdruckes $(n - 1)(1/r + 1/r')$ in Formel (42) ein, so nimmt dieselbe ganz genau die Gestalt des speciellen Hohlspiegelgesetzes an $^1/b + {}^1/d = {}^1/f$, eine bemerkenswerthe Uebereinstimmung.

Um das in 293. mitgetheilte allgemeine Spiegelgesetz I den sphärischen Linsen anzupassen, genügt es, an die Stelle des Krümmungsradius die doppelte Brennweite zu setzen, sowie ferner an die Stelle des Bildes den gleichweit von der Linse entfernten aber auf der entgegengesetzten Seite derselben liegenden Punkt; nennen wir den letzteren das Gegenbild des leuchtenden Punktes, so erhält das citirte Gesetz die Form:

Bei jeder sphärischen Linse wird die doppelte Brennweite durch einen in der Achse liegenden leuchtenden Punkt und dessen Gegenbild harmonisch getheilt.

Hierbei muß indessen noch besonders betont werden, daß die doppelte Brennweite bei einer Convexlinse vor derselben abzutragen ist, ebenso wie beim Concavspiegel (Fig. 154), bei einer Concavlinse aber hinter derselben, ebenso wie beim Convexspiegel (Fig. 157). Dies vorausgesetzt, reicht das obige Gesetz völlig hin, um sich bei einer beliebigen Lage des leuchtenden Punktes über dessen Convex- oder Concavlinsenbild rasch und sicher zu orientiren: Man bestimmt zu den Endpunkten der vorschriftsmäßig aufgetragenen doppelten Brennweite und dem gegebenen Object den vierten harmonischen Punkt (Gegenbild) und überträgt diesen in gleiche Entfernung auf die entgegengesetzte Seite der Linse, so hat man das gewünschte Bild gefunden. Dem Studirenden wird dringend empfohlen, sich durch Construction verschiedener Fälle von der allgemeinen Brauchbarkeit der Bauer'schen Regel zu überzeugen.

304 **Die Bilder der Convex- oder Sammellinsen. Die sechs Linsenregeln.** 1. Ein unendlich weit entfernter Gegenstand hat ein unendlich kleines Bild auf der anderen Seite der Linse im Brennpunkte.

Denn setzt man in der Formel $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$ die Gegenstandsweite $d = \infty$, so ist $1/b = (n - 1)(1/r + 1/r')$; den reciproken Werth von $(n - 1)(1/r + 1/r')$ haben wir aber mit f bezeichnet und Brennweite genannt, also ist $b = f$; das Bild ist unendlich klein, weil alle Strahlen in dem Brennpunkte vereinigt werden. Dieser Gang aller parallelen Strahlen durch den Brennpunkt wird zur geometrischen Construction der Bilder benutzt. Der erste Constructionsstrahl ist der Hauptstrahl, da dieser ungebrochen weiter geht, also das Bild enthalten muß; der zweite Constructionsstrahl ist ein zur Achse paralleler Strahl (Fig. 172), der nach der Brechung durch den Brennpunkt F geht; wo die 2 Constructionsstrahlen sich schneiden, ist in a' das Bild von a.

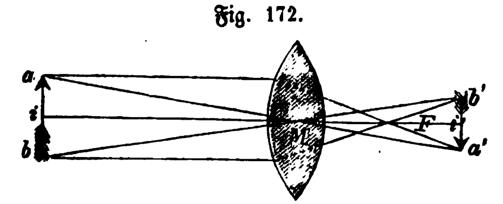
Ist ein Gegenstand nicht gerade unendlich weit, aber doch verhältnißmäßig zur Größe der Linse sehr weit entfernt, wie z. B. die Sonne oder die Sterne, so liegt sein Bild auch

unendlich nahe am Brennpunkte und ist außerordentlich klein; die Sonnenstrahlen vereinigen sich so zu sagen in dem Brennpunkte, erzeugen also dort ein sehr helles und sehr heißes Sonnenbild, das brennbare Körper leicht entzünden kann; daher rührt der Name Brenngläser. Diese Eigenschaft gekrümmter durchsichtiger Körper war schon dem Sänger Orpheus und dem weisen Sokrates bekannt, hat aber weder im Alterthume noch in den letzten Jahrhunderten zu anderen als Schau- und Spielzwecken gedient. Tschirnhausen (1691) verfertigte Brenngläser von 6 bis 12′ Brennweite und 9″ Breite, Bernier (1774) riesige, hohle, mit Weingeist oder Terpentinöl gefüllte Linsen. In Paris wird durch eine Brennlinse jeden Tag die Mittagskanone gelöst und hierdurch der wahre Mittag angegeben. Gefüllte Wasserflaschen von kugeliger Form und Fensterglasschlieren können Feuersbrünste erzeugen. In Sonnenmikroskopen werden die kleinen Gegenstände durch die vereinigten Strahlen grell beleuchtet.

2. **Liegt der Gegenstand weiter als die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so entsteht hinter der Linse ein reelles, verkleinertes umgekehrtes Bild, dessen Entfernung von der Linse größer als die einfache, aber kleiner als die doppelte Brennweite ist.**

Denn setzen wir in der Grundformel $1/b + 1/d = 1/f$ oder $1/b = 1/f - 1/d$ für d einen Werth $> 2f$, so ergibt sich durch leichte Rechnung, daß $b < 2f$. Das Verhältniß der linearen Größe des Bildes zu derjenigen des Gegenstandes ergibt sich aus Fig. 172, in welcher das Bild a′ b′ des Gegenstandes ab nach der angegebenen Methode construirt worden ist. Aus der Aehnlichkeit der Dreiecke abM und a′b′M folgt nämlich, daß $a'b' : ab = Mi' : Mi = b : d$. Setzen wir in das letzte Verhältniß den aus der Grundformel folgenden Werth für $b = df : (d - f)$, so folgt das Verhältniß der Bildgröße zur Objectgröße $a'b' : ab = f : (d - f)$. So lange $d >$ ist als $2f$, so lange ist $f < d - f$, also auch a′ b′ kleiner als ab, und zwar kommt das Bild dem Gegenstande an Größe um so näher, je näher der Gegenstand der doppelten Brennweite kommt. Rückt also der Gegenstand aus unendlicher Entfernung immer näher, so rückt das anfänglich unendlich kleine Bild aus dem Brennpunkte nach der doppelten Brennweite zu und wächst an Größe. Das Bild ist umgekehrt, weil es auf der anderen Seite der Linse liegt und weil die Grenzhauptstrahlen sich demnach zwischen Bild und Gegenstand kreuzen. Diese Eigenschaft der Convexlinsen, von einem weit entfernten Gegenstande in der Nähe des Brennpunktes ein verkleinertes, umgekehrtes, reelles Bild hervorzurufen, hat die ausgedehnteste Anwendung in den Fernrohren und der Camera obscura.

Fig. 172.



3. **Liegt der Gegenstand genau in der doppelten Brennweite, so fällt das reelle, umgekehrte, gleich große Bild hinter der Linse ebenfalls in die doppelte Brennweite.**

Denn für den Fall, daß $d = 2f$ ist, ergibt die Grundformel $(1/b = 1/f - 1/d)$ für b ebenfalls den Werth $2f$. Die Vergrößerung $f : (d - f)$ ist dann $= f : f$ oder $= 1 : 1$, d. h. es findet keine Vergrößerung statt.

4. **Liegt der Gegenstand zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite, so entsteht hinter der Linse ein reelles, umgekehrtes und vergrößertes Bild, dessen Entfernung von der Linse größer ist als die doppelte Brennweite, und das sich um so weiter entfernt, je näher der Gegenstand dem Brennpunkte kommt.**

Denn setzen wir in der Grundformel $(1/b = 1/f - 1/d)$ für d einen Werth $< 2f$, so ergibt sich leicht, daß $b > 2f$. Die lineare Vergrößerung $f : (d - f)$ ist dann größer als 1; folglich ist das Bild größer als der Gegenstand. Die Entfernung des Bildes sowohl, als auch die Vergrößerung desselben sind um so bedeutender, je kleiner die Entfernung d des Gegenstandes wird; beide nähern sich um so mehr dem Unendlichen, je mehr diese sich der einfachen Brennweite nähert. Rückt also der Gegenstand aus der doppelten Brennweite nach dem Brennpunkte zu, so rückt das Bild auf der anderen Seite der Linse aus der doppelten Brennweite hinaus nach dem Unendlichen hin und wächst dabei immer mehr an Größe. Auch diese Eigenschaft der Convexlinsen hat die ausgedehnteste Anwendung in Fernrohren, Mikroskopen, im Sonnenmikroskop, in der Zauberlaterne, der Schusterkugel 2c.

5. **Liegt der Gegenstand in dem Brennpunkte, so entsteht in unendlicher Ent=**

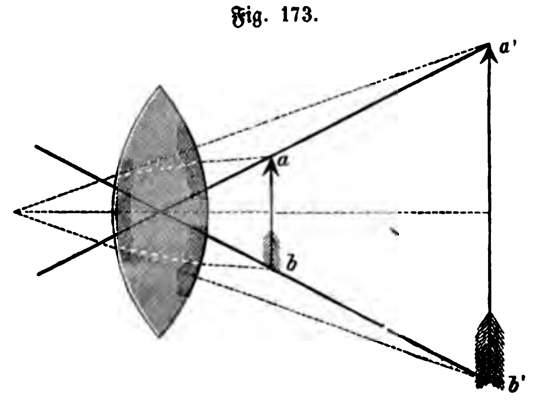
fernung ein unendlich großes Bild, d. h. die von dem Brennpunkte ausgehenden Strahlen werden durch die Linsenbrechung parallel.

Denn setzen wir in der Grundformel für d den Werth f, so ergibt sich $b = \infty$; ebenso ergibt sich die lineare Vergrößerung $f:(d - f) = \infty$. Weil die Strahlen auf der anderen Seite parallel austreten, so erscheint von der anderen Seite her die ganze Linse glänzend und leuchtend; man macht von dieser Eigenschaft der Convexlinsen Anwendung in der Blendlaterne und auf den Leuchtthürmen. Da aber Linsen von solcher Größe, wie sie auf Leuchtthürmen nöthig sind, nur mit großer Schwierigkeit anzufertigen sind, so hat Fresnel zu demselben Zwecke die Polyzonal-Linsen construirt; eine solche besteht aus einer von vielen concentrischen Glasringen umgebenen Mittellinse, deren Dimensionen so berechnet sind, daß sie alle einen gemeinschaftlichen Brennpunkt haben. In diesem befindet sich ein elektrisches Kohlenlicht oder Siderallicht, dessen nach oben und unten gehende Strahlen durch total reflectirende Prismen zurückgeworfen werden und daher alle in dem von mehreren Polyzonallinsen eingeschlossenen Leuchtraume bleiben und dann durch diese parallel austreten müssen.

6. Liegt der Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und der Linse, so entsteht auf derselben Seite der Linse ein imaginäres, aufrechtes und vergrößertes Bild, das weiter von der Linse entfernt ist als der Gegenstand und denselben um so mehr an Größe übertrifft, je näher der Gegenstand an dem Brennpunkte der Linse liegt.

Denn für den Fall, daß $d < f$ ist, ergibt die Grundformel einen negativen Ausdruck für b, der an Zahlenwerth größer als d ist; durch das negative Zeichen ist ausgesprochen, daß die Strahlen eines Punktes sich nicht in der Richtung ihres Voranschreitens, sondern in entgegengesetzter Richtung, also durch Verlängerung nach rückwärts in einem Punkte schneiden. Die voranschreitenden Strahlen vereinigen sich also nicht, sondern sie divergiren noch, wenn sie aus der Linse hervortreten; für ein auf der anderen Seite der Linse befindliches Auge bringen sie indeß den Eindruck hervor, als ob sie von lichtgebenden Punkten herkämen: sie erzeugen ein imaginäres Bild. Dieses Bild ist weiter von der Linse entfernt als der Gegenstand, denn b ist größer als d; es ist aufrecht, weil Bild und Gegenstand auf derselben Seite der Linse liegen; es ist größer als der Gegenstand, weil der Raum zwischen den Grenzhauptstrahlen in größerer Entfernung von der Linse immer größer wird; auch ergibt sich dies daraus, daß die Vergrößerung $f:(d - f)$ größer als 1 ist; je mehr d gleich f wird, desto mehr nähert sich die Größe des Bildes dem Unendlichen. Diese Wirkung einer Sammellinse auf einen innerhalb der Brennweite liegenden Gegenstand wird auch durch die geometrische Construction des Bildes a′ b′ eines Gegenstandes ab (Fig. 173) sofort klar. Auch diese Eigenschaft der Sammellinsen wird in den Fernrohren, Lupen, Mikroskopen, Panoramen u. s. w. angewendet.

Fig. 173.



Wie in dem fünften Falle divergente Strahlen durch biconvexe Linsen parallel gemacht werden und in dem sechsten Falle eine Verminderung der Divergenz erfahren, so finden wir in den vorausgehenden Fällen, daß parallele oder divergente Strahlen durch solche Linsen gar zur Convergenz gebracht werden; diese den drei ersten Linsenarten gemeinsame Eigenschaft hat denselben den Namen Sammellinsen verschafft. Consequenter Weise muß die Convergenz zusammenlaufender Strahlen durch eine Sammellinse vergrößert und der Vereinigungspunkt derselben der Linse mehr genähert werden.

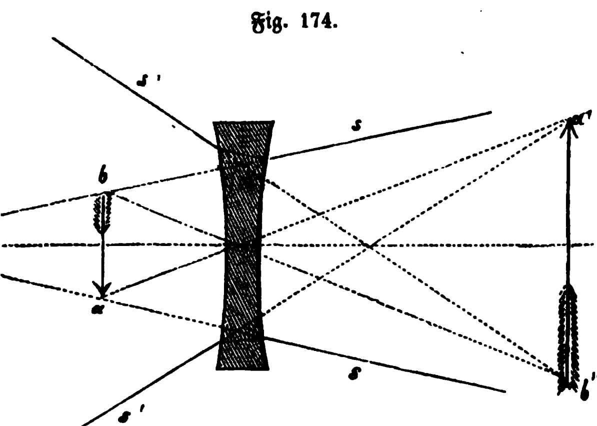
Die Eigenschaften der Bilder durch Concav- oder Zerstreuungslinsen ergeben sich aus der Formel $1/b + 1/d = -(n - 1)(1/r + 1/r')$ oder, wenn wir das Product rechts mit $1/f$ bezeichnen, $1/b + 1/d = -1/f$; hieraus folgt nämlich, daß $1/b = -(1/d + 1/f)$, daß also die reciproke Bildweite negativ und größer als die reciproke Gegenstandsweite ist; folglich ist die Bildweite selbst ebenfalls negativ und kleiner als die Gegenstandsweite, d. h. die Strahlen vereinigen sich nicht in der Richtung ihres Fortschreitens, sondern erst bei ihrer 305

Verlängerung nach rückwärts; sie vereinigen sich also nicht wirklich, scheinen aber von einem Punkte zu kommen, der auf derselben Seite wie der Gegenstand und näher an der Linse als dieser liegt. Das Bild ist also imaginär und näher an der Linse als der Gegenstand; da es mit diesem auf derselben Seite der Linse liegt, so ist es aufrecht, und da die Grenzhauptstrahlen an einem der Linse näheren Punkte enger beisammen liegen als an der entfernteren Objectstelle, so ist das Bild verkleinert. Concave Linsen erzeugen also von Gegenständen, d. i. durch divergent auf sie fallende Strahlen imaginäre, aufrechte, verkleinerte, näher an der Linse gelegene Bilder.

Aus der näheren Lage des Bildpunktes folgt, daß die durch die Linse gegangenen divergenten Strahlen stärker divergiren; concave Linsen verstärken also die Divergenz aus einander gehender Strahlen; ebenso bringen sie parallele Strahlen zur Divergenz, machen convergente Strahlen weniger convergent, parallel oder gar divergent, kurz sie zerstreuen die Strahlen, wodurch sich der Name Zerstreuungsgläser erklärt. Von besonderer Wichtigkeit sind noch die zwei letzten Fälle. Convergente Strahlen werden nämlich parallel, wenn sie nach einem Punkte gerichtet sind, der um den Abstand f hinter der Linse liegt; für diesen Fall ist $d = -f$, also wird $1/b = -(-1/f + 1/f) = -0$, folglich ist $b = \infty$. Das Bild liegt im Unendlichen, die Strahlen sind parallel. Umgekehrt werden parallel auftreffende Strahlen so divergirt, daß sie von einem hinter der Linse im Abstande f von derselben liegenden Punkte zu kommen scheinen. In diesem Punkte vereinigen sich aber niemals die Strahlen wirklich, er heißt daher auch nicht Brennpunkt, sondern Zerstreuungspunkt, und f heißt Zerstreuungsweite.

Wenn nun Strahlen, die nach dem hinter der Linse liegenden Zerstreuungspunkte convergiren, durch die Concavlinse parallel gemacht werden, so müssen Strahlen mit noch schwächerer Convergenz sogar divergent gemacht werden. Strahlen also, welche nach einem Punkte hinter der Linse laufen, dessen Entfernung von der Linse größer als die Zerstreuungsweite ist, sind nach der Brechung divergent, scheinen also von einem Punkte zu kommen, der vor der Linse liegt, sie erzeugen ein imaginäres Bild vor der Linse. Dieser für die praktische Optik wichtige Fall ist in Fig. 174 dargestellt; die auf die Linse fallenden convergenten Strahlen s würden bei ungestörtem Fortschreiten das Bild ab erzeugen, werden aber durch die Linse so gebrochen, daß sie die Richtungen s' erhalten und demnach von a' und b' zu kommen scheinen, wo durch diese und die Grenzhauptstrahlen aa' und bb' ein Bild a' b' des nicht zu Stande gekommenen Bildes ab erzeugt wird. Dieses zweite Bild ist imaginär, wie alle Hohlgläserbilder, aber ausnahmsweise umgekehrt und unter Umständen vergrößert. Denn die Vergrößerung ist hier $-f:(-d+f) = f:(d-f)$; dieser Werth aber ist so lange größer als 1, als $f > d - f$ oder als $2f > d$ oder $d < 2f$. Wenn also die Entfernung der Linse von dem nicht zu Stande gekommenen Bilde größer als die einfache, aber kleiner als die doppelte Zerstreuungsweite ist, so entsteht ein umgekehrtes und vergrößertes Bild, und die Vergrößerung ist um so bedeutender, je näher jene Entfernung der einfachen Zerstreuungsweite kommt.

Fig. 174.



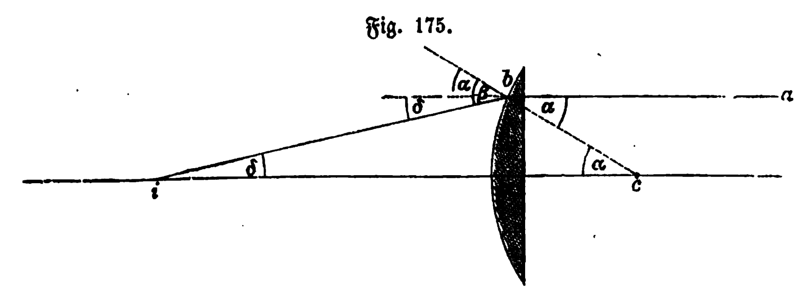
Den Nachweis der Linsenregeln führt man mittels der optischen Bank, einer langen, fest aufgestellten, mit Gleitstücken versehenen Schiene. Das eine Gleitstück trägt eine Lichtquelle, auf das zweite können Linsen und auf das dritte Tafeln befestigt werden, welche aus Rahmen bestehen, die mit weißem Papier oder auch mit Strohpapier überzogen sind; die in der Luft schwebenden reellen Bilder können auch ohne Tafel gesehen werden; doch ist dies bei Linsen schwieriger als bei den Spiegeln, wo derselbe Apparat zum Nachweise benutzt wird.

306 **Die sphärische Abweichung.** Unter der sphärischen Abweichung versteht man die Eigenschaft kugelförmig begrenzter Linsen, daß dieselben nicht alle von einem

Punkte ausgehenden Strahlen wieder in einem Punkte vereinigen, daß also nicht ein Bildpunkt (Brennpunkt), sondern eine Brennlinie (Diakaustika) oder ein Brennraum durch Vereinigung der gebrochenen Strahlen entsteht. Hieraus entsteht eine Undeutlichkeit der Linsenbilder, ohne deren Beseitigung die Linsen keineswegs zu bedeutender Anwendung hätten gelangen können; die Beseitigung dieser Undeutlichkeit geschieht gewöhnlich durch die Blendungen oder Diaphragmen, undurchsichtige Ringe, welche den äußeren Theil, den Rand der Linse, verdecken; hierdurch werden die Randstrahlen vom Gange durch die Linse abgehalten und nur die centralen Strahlen durchgelassen. Unter dieser Voraussetzung aber gelten die Linsengesetze, unter dieser Voraussetzung vereinigen sich die Strahlen eines Punktes wieder in einem Punkte. Die sphärische Abweichung ist nämlich um so stärker, je größer die Oeffnung einer Linse (die Apertur) und je stärker die Krümmung derselben ist, je kleiner also der Krümmungsradius, also auch die Brennweite wird.

Beweis. Ein allgemeiner Beweis würde hier zu weitläufig sein; wir führen denselben nur für parallele Strahlen, die auf eine planconvexe Linse (Fig. 175) fallen. Wir suchen die Entfernung im, in welcher der durch die Linse gebrochene, zur Achse parallel ge-

Fig. 175.



wesene Strahl ab nach der Brechung die Achse trifft; dieselbe ist $im = bm : \tan\delta$. Ein Werth für das hierin erscheinende bm folgt aus $\triangle$ bmc, in welchem $bm = bc \cdot \sin\alpha = r \sin\alpha$, da bc der Radius der Krümmung ist; folglich ist $im = r \sin\alpha : \tan\delta$. Da man nun für einen beliebigen Einfallswinkel α immer nach der Gleichung $\sin\alpha : \sin\beta = \frac{3}{2}$ den zugehörigen Werth von β und daraus den von $\delta = \beta - \alpha$ finden kann, so läßt sich für eine planconvexe Linse leicht berechnen, welche Werthe im für verschiedene Einfallswinkel α annimmt; es ergibt sich dann, wie z. B. für $\alpha = 1^0$ die Entfernung im nahezu $= 2r$, für $\alpha = 30^0$ aber nur $= 1{,}5r$ ist, daß also Strahlen, welche sehr verschiedene Einfallswinkel haben, sich in verschiedenen Entfernungen von der Linse vereinigen. Diese Entfernungen sind um so verschiedener, je größer der Unterschied zwischen dem größten und dem kleinsten Einfallswinkel ist; dieser Unterschied ist aber um so größer, je größer die Apertur und je kleiner der Radius ist. Aus dem Werthe für im folgt auch, daß Strahlen mit gleichen Einfallswinkeln, d. i. Strahlen, welche auf einen um den Mittelpunkt einer Linsenfläche beschriebenen Kreis treffen, sich in einem Punkte vereinigen. Eingehende Rechnung ergibt, daß concavconvexe Linsen bei einem gewissen Verhältnisse der Radien frei von der sphärischen Abweichung sind, sowie daß eine geeignete Verbindung zweier Linsen ebenfalls diesen Fehler beseitigen kann; solche Linsen werden aplanatische genannt.

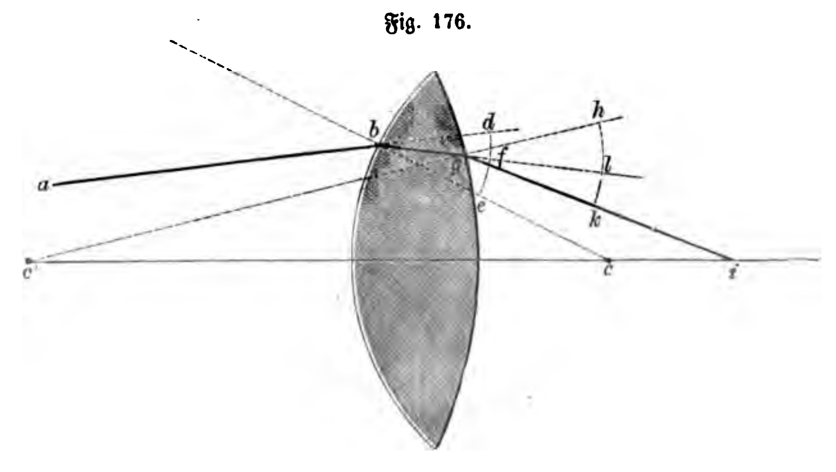
Nachweise. Die Wirkung der sphärischen Abweichung, die Undeutlichkeit der Bilder, zeigt man am besten mit einer von den altmodischen, großen, stark gewölbten Linsen; das Bild wird viel deutlicher, wenn man den Rand verdeckt. Stellt man zwischen die Linse und das Licht einen kreisförmigen, die Linse ganz verdeckenden Schirm, der 2 Löcherkreise hat, einen kleinen und einen großen, so erhält man 2 Bilder, die man auf einer Papiertafel auffängt; durch Verdecken der Löcher kann man leicht erfahren, welches von den centralen und welches von den Randstrahlen herrührt. In geringer Entfernung der Papiertafel erzeugen die Randstrahlen einen Bildpunkt und die centralen einen Bildring: die ersteren sind in einem Punkte vereinigt, die letzteren nicht, in größerer Entfernung entsteht der Ring durch die Randstrahlen, während die centralen einen Punkt bilden. Hiermit ist auch gezeigt, daß der Vereinigungspunkt der Randstrahlen näher an der Linse liegt als derjenige der centralen Strahlen.

Außer der sphärischen Abweichung besitzen die Linsenbilder durch die Zerlegung der Lichtstrahlen in Farben noch eine zweite Undeutlichkeit, die chromatische Abweichung. (314.).

307 Aufg. 509. Wie groß ist der Brechungswinkel für einen Strahl, der unter 40° aus Luft in Glas, unter 65° aus Luft in Wasser, unter 90° aus Luft in Alkohol, unter 80° aus Luft in Diamant übergeht? Aufl.: 25° 22′, 42° 43′, 46° 53′, 23° 42′. — A. 510. Wie groß ist der Brechungswinkel für einen Strahl, der unter 20° aus Glas, aus Wasser, aus Schwefelkohlenstoff, aus Bleichromat in Luft übergeht? Aufl.: 30° 52′, 27° 11′, 35° 4′, 90°. — A. 511. Unter welchem Winkel muß ein Strahl aus Luft auf Kalkspath, Steinöl und Aether treffen, damit er unter dem Winkel von 80° eintrete? Aufl.: 36° 33′, 39° 38′, 46° 29′. — A. 512. Wie groß ist der B.-E. von Glas gegen Luft, wenn ein Strahl von 30° unter 19° 29′ im Glas fortschreitet? Aufl.: $^3/_2$. — A. 513. Zu beweisen, daß ein durch mehrere Medien mit parallelen Grenzflächen gehender Strahl parallel zu seiner ursprünglichen Richtung austritt, wenn das letzte Medium dasselbe ist wie das erste? Anl.: Man benutze die bekannte Thatsache, daß $\sin\alpha : \sin\beta = c : c'$, $\sin\beta : \sin\beta' = c' : c''$ u. s. w.; statt $c' : c''$ u. s. w. kann man auch die Verhältnisse der B.-E. benutzen. — A. 514. Zu beweisen, daß der B.-E. zweier Medien gegen einander gleich dem Quotienten der B.-E. der beiden Medien gegen ein und dasselbe dritte ist? Anl.: Man schreibe die Sinus-Verhältnisse für die 2 Medien gegen das dritte an und benutze, daß nach A. 513 der erste Einfallswinkel gleich dem zweiten Brechungswinkel ist. — A. 515. Wie groß ist der B.-E. von Diamant gegen Glas, Wasser und Schwefelkohlenstoff? Aufl.: Nach A. 514 erhält man 1,658, 1,865, 1,48. — A. 516. Durch Zeichnung zu finden, wie ein unter 20° in Wasser getauchter Stab erscheint? Anl.: Benutze für einen eingetauchten Punkt des Stabes eine Construction, ähnlich Fig. 164 oder 165. — A. 517. Durch Zeichnung zu finden, daß die Münze in 298 .6 in Wasser größer erscheint? Anl.: Man construire die Brechung zweier Grenzstrahlen des Durchmessers. — A. 518. Wie ändert sich die Convergenz convergenter und die Divergenz divergenter Strahlen, wenn sie aus einem dünneren in ein dichteres Medium und umgekehrt übergehen? Anl.: Man benutze in allen 4 Fällen die Gesetze 4, 5 und 6 in 298. — A. 519. Zu erklären, daß bei Mondfinsternissen an manchen Orten Sonne und Mond einander gegenüber über dem Horizonte gesehen werden, während doch die zwei Weltkörper mit der Erde in gerader Linie stehen sollten? Anl.: Benutze S. 320. — A. 520. Zu beweisen, daß die Dichte des Aethers in einem durchsichtigen Körper n^2 mal so groß ist als im leeren Raume? Anl.: Man benutze die bekannten Fln. $n = c : c'$ und $c = \sqrt{(e : d)}$ und das im Eingange von 298. über die Elasticität des Aethers Gesagte. — A. 521. Zu beweisen, daß der absolute B.-E. der Luft $= \sqrt{[1 : (2 - n^2)]}$, wenn n der B.-E. von gewöhnlicher gegen doppelt so dichte Luft ist? Anl.: Man benutze den Satz von Arago und Biot (302.) über die brechende Kraft $(n^2 - 1) : d$. — A. 522. Wie groß ist der Grenzwinkel der totalen Reflexion für Bleichromat, für das stärkst brechende Flintglas, für Schwefelkohlenstoff? Aufl.: 19° 59′, 30°, 36° 32′. — A. 523. Wie groß ist der Durchmesser des Kreises, innerhalb dessen ein 10m unter Wasser befindlicher Fisch aus dem Wasser heraussehen kann, während er außerhalb desselben den Grund sich spiegeln sieht? Aufl.: $2 . 10 \tang 48° 27' = 22{,}566$ m. — A. 524 Warum ist geöltes Papier durchscheinend? Anl.: Oel und Papier stehen einander in optischer Dichte näher als Luft und Papier; daher ist der Grenzwinkel der totalen Reflexion größer und diese selbst geringer (299.) — A. 525. Warum ist Luft vor und nach Regen durchsichtiger? Anl.: Außer dem eben angeführten Grunde kommt noch die Beseitigung der Staubtheilchen in Betracht. — A. 526. Unter welchem Winkel muß ein Strahl wenigstens auf die eine Kathetenfläche eines gleichschenklig rechtwinkligen Prismas fallen, um an der Hypotenusenfläche total reflectirt zu werden, so daß diese, gegen den Himmel gehalten, in blendendem Glanze erscheint? Aufl.: Nach 300. ist $\beta = B - g = 45 - 38 = 7°$; hieraus ist, wenn $n = 1{,}624$, der Einfallswinkel $\alpha = 11° 25'$. — A. 527. Wie groß ist der B.-E. einer Substanz, für welche dieser Winkel $= 15°$ ist? Aufl.: Die Gl. $\beta = B - g$ ergibt $1/n \sin 15 = \sin (45 - g)$ $= \sin 45 \cos g - \cos 45 \sin g = \sin 45 \sqrt{(1 - (1/n)^2)} - 1/n \cos 45$; hieraus $\sin 15 = \sin 45 \sqrt{(n^2 - 1)} - \cos 45$ und $n = 1{,}69$. — A. 528. Wollaston bestrich eine Stelle der Hypotenusenfläche des eben erwähnten Prismas (B.-E. = 1,6) mit Butter (oder anderen undurchsichtigen Körpern) und mußte dann das Prisma weiter gegen den hellen Himmel drehen, damit auch diese Stelle in Silberglanz erschien; der Einfallswinkel der Strahlen war dann für Butter 24° 12′; hieraus berechnete er die B.-E. undurchsichtiger Körper; wie groß ist der B.-E. n′ der Butter? Anl.: Man benutze die letzte Gleichung, setze aber dort $n : n'$ statt n, weil jetzt $\sin g$ nicht $= n$, sondern $= n : n'$; man erhält dann $n' = 1{,}474$. — A. 529. Durch Rechnung und Construction den Weg eines Strahles zu finden, der auf ein gleichseitiges Prisma unter 30° fällt? Aufl.: (Fig. 167) $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin\beta$; $\beta' = B - \beta$; $\sin\alpha' = {}^3/_2 \sin\beta'$; hieraus $\alpha' = 77° 7'$. — A. 530. Unter welchem Winkel muß ein Strahl auffallen, damit er in dem Prisma der Basis desselben parallel sei? Aufl.:

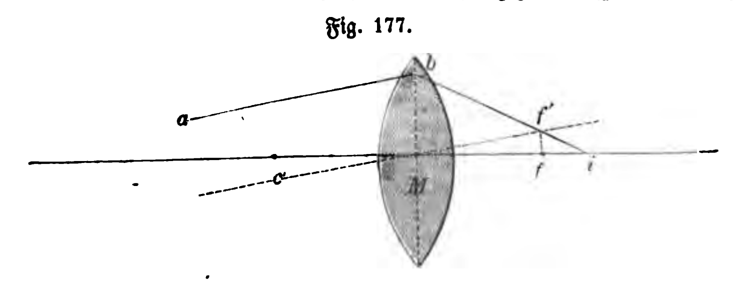
$\beta = 90 - 60^\circ$; $\sin\alpha = {}^3/_2 \sin 30 = 0,75$; $\alpha = 48^\circ 35'$. — A. 531. In einem gleichseitigen Steinsalzprisma ist der Winkel der kleinsten Ablenkung $= 42^\circ 10'$; wie groß ist der B.-E. des Steinsalzes? Aufl.: 1,557. — A. 532. Eine Tabelle für das Brechungsvermögen und das Refractionsäquivalent der S. 327 angeführten Körper zu berechnen. — A. 533. Den Gang eines schief einfallenden Strahles durch eine biconvexe Linse von beiderseits ungleicher Krümmung (B.-E. $= {}^3/_2$) zu construiren? Anb.: ab (Fig. 176) sei der

Fig. 176.



Strahl, c und c′ die Mittelpunkte der beiden Krümmungen der Linse; bei kleinen Einfallswinkeln kann $n = {}^3/_2$, das bekannte Sinusverhältniß, auch als das Verhältniß der Winkel oder der ihnen entsprechenden Bogen angesehen werden; hieraus ergibt sich der allerdings nur annähernd genaue Weg des Strahles abgi. — A. 534. Der optische Mittelpunkt hat nicht für alle Linsen die Definition S. 329; er ist derjenige Punkt einer Linse, durch welchen alle Strahlen ungebrochen hindurch gehen, und liegt demnach für die gewöhnlichste Linse in der Mitte des inneren Theiles der Achse, in der Mitte der Dicke d der Linse; wo liegt er aber im Allgemeinen, wenn r und r′ die beiden Krümmungsradien sind? Anb.: Für einen durch diesen Punkt gehenden Strahl muß der zweite Brechungswinkel dem ersten Einfallswinkel und daher auch der zweite Einfallswinkel dem ersten Brechungswinkel gleich sein; folglich müssen die beiden Einfallslothe einander parallel werden; daraus ergibt sich der Abstand des opt. M. von der einen Linsenfläche $= dr : (r + r')$ und von der anderen $= dr' : (r + r')$. — A. 535. Die Lage des optischen M. für die einzelnen Linsenarten anzugeben? — A. 536. Die Lage des Brennpunktes für eine biconv. L. von beiderseits gleicher Krümmung zu finden? Aufl.: Mit Hülfe der Fl. $1/f = (n - 1)(1/r + 1/r')$ und des B.-E. $= {}^3/_2$ ergibt sich $f = r$; der Brennpunkt liegt in dem Mittelpunkte. — A. 537. Den Gang eines zur Achse divergenten und eines convergenten Strahles für eine solche Linse durch einfache Construction zu finden? Aufl.: Fig. 177. Zu dem Strahle ab

Fig. 177.



ziehe man die Nebenachse c′M parallel und schneide darauf ab Mf′ = Mf, so ist bf′i der gebrochene Strahl; ähnlich für einen conv. Str. — A. 538. Das Bild eines auf der Achse liegenden Punktes zu finden? Anb.: Man ziehe durch den Punkt einen Strahl und suche

nach A. 537 dessen Gang; wo er die Achse schneidet, ist das Bild. — A. 539. Der Schüler übe sich im Auffinden der Bilder von Achsen- und anderen Punkten für diese und alle anderen Linsenarten durch Construction theils nach A. 537, theils nach den Regeln, die im Eingange von 304. angegeben sind. — A. 540. Ebenso sollen durch Construction die Bilder von geraden und krummen Linien, von Flächen und Körpern gefunden werden für alle nur denkbaren Lagen gegen alle Linsenarten. — A. 541. Eine allgemeine Formel für die Brennweite einer Linse abzuleiten? Aufl.: Die Fl. 42 in Verbindung mit $1/f = (n - 1)(1/r + 1/r')$ ergibt $f = \pm 2rr' : (r \pm r')$. — A. 542. Für einzelne Linsenarten die Größe von f zu finden? Aufl.: Für die gleichs. biconv. ist $f = r$, für die planconvexe $f = 2r$, für die concav-conv., wo $r = 2r'$, ist $f = 4r$; für die gleichs. biconc. ist $f = -r$, für planconc. $f = -2r$, für convexconc. $(r = 2r')$ ist $f = -4r$; hierbei ist immer vorausgesetzt, daß $n = 3/2$; für ein anderes n ist allgemein $f = \pm rr' : (n - 1)(r \pm r')$. — A. 543. Aus der Formel $1/b + 1/d = -(n - 1)(1/r + 1/r')$ für concave Linsen die Lage, sowie auch die Größe von Bildern für alle Fälle zu berechnen, die in 304. für convexe Linsen betrachtet wurden. — A. 544. Die Radien einer Biconvexlinse seien 20 und 30 cm: wie groß ist ihre Brennweite; wo liegt und wie groß ist bei dieser Linse das Bild eines 80 cm entfernten, 1 m langen Gegenstandes? Aufl.: $f = 24$ cm; $b = 34\,2/7$ cm; Größe $= 42\,6/7$ cm. — 545. Das Bild eines Gegenstandes soll bei dieser Linse 6mal so groß als der Gegenstand sein; wo muß derselbe stehen? Aufl.: $d = 28$ cm. — A. 546. Allgemein, wie weit muß bei einer Sammellinse in Brennweiten f ausgedrückt, der Gegenstand entfernt sein, damit sein Bild m mal so groß sei als er selbst? Aufl.: $d = f(m + 1) : m$. — A. 547. Wie weit muß von einer Sammellinse ein Gegenstand entfernt sein, damit die Entfernung von seinem reellen Bilde $= m$ sei? Aufl.: $d = 1/2\,[m \pm \sqrt{(m^2 - 4fm)}]$.

6. Die Lehre von der Farbenzerstreuung oder Dispersion des Lichtes.

Die Farbenlehre.

308 **Licht und Farbe.** Das Licht ist ein Zustand transversaler Aetherschwingungen von 400 bis 800 Billionen in einer Secunde überhaupt; die Farbe ist ein der Zahl nach bestimmter Schwingungszustand oder eine Mischung solcher bestimmten Schwingungszustände. Farbe und Licht sind demnach identisch; aber jede Schwingungszahl zwischen den angegebenen Grenzen ist Licht, während jede andere Schwingungszahl den Eindruck einer anderen Farbe erzeugt, und mehrere Schwingungszahlen zusammen sich ebenfalls zu einem bestimmten Schwingungszustande combiniren und daher ebenfalls einen bestimmten Farbeneindruck hervorrufen. *Einfaches, homogenes oder einfarbiges Licht* ist ein solcher Schwingungszustand des Aethers, in welchem alle Aethertheilchen dieselbe Schwingungsdauer haben oder in einer Secunde gleichviel Schwingungen vollziehen (homogene Farbe); *gemischtes, zusammengesetztes Licht* dagegen ist ein Schwingungszustand des Aethers, in welchem die Bewegungen der Aethertheilchen aus Schwingungen von verschiedener Dauer combinirt oder aus verschiedenen Schwingungszahlen zusammengesetzt sind (heterogene Farbe).

Die meisten gewöhnlichen Lichtquellen, die Sonne, die irdischen Flammen und Gluthen, überhaupt alle glühenden festen und flüssigen Körper strahlen zusammengesetztes Licht aus, und zwar ist das Licht derselben aus zahllosen Schwingungszahlen oder Farben zusammengesetzt; nahezu homogenes Licht d. i. solches Licht, welches nur aus wenigen Schwingungszahlen, wenigen Farben besteht, wird von glühenden Dämpfen und leuchtenden Gasen (bei gewöhnlichem Drucke) ausgestrahlt; bei höherem Drucke scheint die Zahl der von leuchtenden Gasen ausgestrahlten Farben ebenfalls sehr groß zu sein.

Bekanntlich sind (nach den Annahmen der neueren Physik) die Moleküle aller Körper in fortwährender, unendlich feiner, aber sehr rascher Bewegung, deren lebendige Kraft die Temperatur der Körper bildet; und zwar besitzen die Moleküle der festen und flüssigen Körper schwingende und die Moleküle der Luftarten fortschreitende Bewegungen. Bei gewöhnlicher Temperatur ist die Schwingungszahl der Körpermoleküle 100, 200, 300 Billionen

in 1 Sec.; nimmt die Temperatur zu, so muß auch die lebendige Kraft der Moleküle zunehmen, d. h. die Amplitude der Schwingungen muß größer werden. Je höher die Temperatur wird, desto häufiger werden die schwingenden Moleküle auf einander stoßen und dadurch ihre Schwingungszahl vergrößern; hiermit soll aber nicht gesagt sein, daß alle Moleküle durch Stoß gegen andere eine höhere Schwingungszahl annehmen, vielmehr scheint selbst noch bei den höchsten Temperaturen die größte Zahl der Moleküle die angegebenen geringeren Schwingungszahlen beizubehalten und nur die Amplitude zu vergrößern. Ein Theil der Moleküle aber schwingt immer schneller, je höher die Temperatur steigt, und erreicht bei 500° eine Schwingungszahl von 400 Billionen; daher fangen alle Körper bei 500° an zu leuchten und zwar mit rothem Lichte. Steigt die Temperatur noch höher, so entstehen auch noch größere Schwingungszahlen, 600, 800, 1000 und mehr Billionen in der Secunde, ohne daß die niedrigeren Schwingungszahlen verschwinden. Weißglühende Körper von 1000—2000° C. strahlen eine unendliche Anzahl von verschiedenen Schwingungszahlen aus. Die Verschiedenheit dieser Schwingungszahlen findet schon darin ihre Erklärung, daß nicht alle Moleküle gegen einander stoßen, wird aber noch klarer, wenn man die unendliche Verschiedenheit bedenkt, in welcher die Moleküle fester und flüssiger Körper nach ihrer Lage gegen einander sich befinden, wodurch dieselben mit den verschiedensten Kräften in ihrer Lage festgehalten werden und dadurch auch durch eine äußere Einwirkung, wie eine hohe Temperatur, die allerverschiedensten Bewegungen annehmen müssen. — Ganz anders verhält sich die Sache bei den luftförmigen Körpern; die Moleküle derselben haben eine fortschreitende Bewegung, es ist daher bei vielen Luftarten schwierig, dieselben zum Leuchten d. i. zu schwingender Bewegung zu bringen. Die farblosen und durchsichtigen Gase, wie Sauerstoff, Stickstoff u. s. w. leuchten nur, wenn die heftigsten Erschütterungen, der elektrische Schlag und der elektrische Funkenstrom, durch dieselben gehen; die brennbaren Gase, wie Wasserstoff, haben nur äußerst geringe Leuchtkraft, und nur glühende Metalldämpfe, welche offenbar dem festen Zustande sehr nahe stehen, strahlen unter gewöhnlichen Umständen starkes Licht aus. Außerdem enthalten die meisten leuchtenden Luftarten nur wenige Schwingungszahlen. Denn bekanntlich ist bei den Molekülen der Luftarten die anziehende Kraft weit überwogen durch die lebendige Kraft der Moleküle, die Ausdehnsamkeit überwiegt, ein Zusammenhang existirt nicht mehr. Die Moleküle der Luftarten können daher nur eine geringe Verschiedenheit in ihrer Lage gegen einander haben; sie müssen also auch durch eine äußere Einwirkung, wie eine höhere Temperatur, eine Erschütterung, nahezu gleiche Bewegungen erhalten; die Luftmoleküle können nur wenige verschiedene Schwingungszahlen annehmen, nur wenige Farben ausstrahlen. Möglicherweise werden dieselben nur durch die Schwingungen der Atome innerhalb der Moleküle hervorgebracht. Bei höherem Drucke aber, wo sich die Luftarten mehr den flüssigen oder festen Körpern nähern, kann auch die Anzahl der Schwingungszahlen, der ausstrahlenden Farben größer werden.

309 **Verschiedene Brechbarkeit der verschiedenen Schwingungszahlen** (Cauchy 1836). Zum Nachweise der vorausgehenden Sätze bedürfen wir einer Eigenschaft der verschiedenen Farben oder Schwingungszahlen, welche anfänglich überraschend erscheinen mag, da sie manchen der früher vorgetragenen Lehren zu widersprechen scheint. Die Lichtstrahlen haben eine nach der Schwingungszahl verschiedene Brechbarkeit; je größer die Schwingungszahl ist, desto stärker werden die Strahlen gebrochen; das rothe Licht erfährt die geringste, das violette Licht die stärkste Brechung.

Dies widerspricht insofern früheren Lehren, als die Brechung in einer Aenderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit beruht, und als diese Geschwindigkeit sowohl beim Schalle (273.) als auch beim Lichte (286.) unabhängig von der Größe und der Dauer der Schwingungen sein soll; die bekannte Formel $c = \sqrt{(e:d)}$ zeigt uns die Geschwindigkeit des Lichtes zwar als von der Dichte und der Elasticität des Aethers abhängig, aber ganz unberührt von der Intensität und der Farbe des Lichtes, was in dem betreffenden Abschnitte besonders hervorgehoben wurde. Es ist dies auch vollkommen richtig für den freien Aether des sogenannten leeren Weltraumes; hier pflanzt sich jede Lichtstärke und jede Lichtfarbe mit gleicher Geschwindigkeit fort; es gilt auch noch unendlich nahe für den fast freien Aether der Luftarten. Würde es auch noch für den durch die körperliche Anziehung der Moleküle beeinflußten Aether der Körperwelt gelten, würden sich also auch die verschiedenen Farben oder Schwingungszahlen durch die Körper mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen, also bei dem Eintritte in die Körper eine ganz gleiche Verminderung der Geschwindigkeit erfahren, so würde auch die Folge dieser Verminderung, die Brechung nämlich, für alle Schwingungszahlen dieselbe sein. Dies ist aber nicht der Fall. In den Körpern ist näm-

lich der Aether zwar von derselben Elasticität, aber von größerer Dichte als im leeren Raume; auch ist er zwischen die Körpermoleküle eingeschlossen, kann also nicht frei ausweichen wie im leeren Raume; folglich wird bei jeder Schwingung der vor dem schwingenden Atom befindliche Äther noch mehr verdichtet; es hat also die eindringende Lichtbewegung einen gewissen Widerstand bei jeder Schwingung zu überwinden; dieser Widerstand muß daher mit der Schwingungszahl zunehmen; da nun die Folge dieses Widerstandes eine Verminderung der Geschwindigkeit des Lichtes ist, so muß Licht von großer Schwingungszahl sich etwas langsamer durch einen Körper fortpflanzen als Licht von kleiner Schwingungszahl. Von der Verminderung der Geschwindigkeit rührt aber die Brechung her (232.); die Brechung ist um so stärker, je mehr die Geschwindigkeit vermindert wird; folglich müssen hohe Schwingungszahlen stärker gebrochen werden als niedere.

310 **Zerlegung des Lichtes durch Brechung in Prismen** (Newton 1666). Auf der verschiedenen Brechbarkeit der verschiedenen Schwingungszahlen oder Farben beruhen die berühmten Versuche Newtons über die Zerlegung des Lichtes durch Prismen, welche der Theorie weit vorausgeeilt sind, ja diese Theorie sehr viel später erst geschaffen haben.

1. Läßt man durch eine Oeffnung in einem Fensterladen mittels eines Heliostaten Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer dringen und auf einen Schirm fallen, so zeigt sich auf dem Schirme ein kleines kreisförmiges Sonnenbild. Stellt man dem Strahlenbündel ein Glasprisma in den Weg, so verschwindet der helle Kreis; statt dessen erscheint an einer der brechenden Kante entgegengesetzten Stelle ein Streifen von der Breite des Kreises, an den Seiten geradlinig, an den Enden bogenförmig begrenzt, nicht hell weiß, sondern siebenfarbig: roth, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett, das rothe Ende der ursprünglichen Lage des Sonnenbildes am nächsten, das violette am weitesten entfernt. Die Farben gehen ohne irgend eine Unterbrechung allmälig in einander über. Der farbige Streifen wird Spectrum genannt. Ein ähnliches Spectrum gibt auch das Licht der meisten künstlichen Lichtquellen, Knallgaslicht, weißglühende Metalle, das elektrische Kohlenlicht, Gas-, Kerzen- und Oelflammen, Magnesiumlicht u. s. w.

2. Macht man in den Schirm an der Stelle des rothen Streifens des Spectrums eine Oeffnung und läßt nun das durchgedrungene rothe Licht auf einen zweiten Schirm fallen, so erhält man dort den rothen Streifen; stellt man aber dem rothen Strahlenbündel ein zweites Prisma in den Weg, so verschwindet der rothe Streifen von seiner ersten Stelle, erscheint aber unverändert an einer anderen, wiederum von der brechenden Kante des Prismas abgewendeten Stelle des Schirmes. Macht man denselben Versuch mit einem anderen farbigen Streifen des Spectrums, so erhält man immer dasselbe Resultat, nur ist die zweite Stelle des Streifens um so weiter von der ersten entfernt, je näher der Streifen dem Violett liegt.

Diese Versuche zeigen die Wahrheit der vorausgegangenen Sätze, daß die verschiedenen Farben oder Schwingungszahlen eine verschiedene Brechbarkeit besitzen, und daß das weiße Sonnenlicht, wie auch das Licht der gewöhnlichen künstlichen Lichtquellen zusammengesetzt ist. Gegen den letzten Satz könnte man den Einwand erheben, daß die Farben des Spectrums durch eine Stoffeinwirkung des Prismas auf das Licht entstanden sein könnten, nicht aber schon vorher in dem Lichte vorhanden gewesen sein müßten. Dieser Einwand wird zunächst dadurch widerlegt, daß Prismen aus den verschiedensten Stoffen zwar die Länge des ganzen Spectrums, sowie das Verhältniß der einzelnen Theile verändern können, daß sie dagegen sämmtlich immer dieselben Farben liefern, wie auch dadurch, daß ein zweites Prisma, das parallel oder geneigt zum ersten gestellt ist, keine Farbenänderung mehr hervorruft, sondern die Farben nur mehr aus einander zieht. Am entschiedensten aber wird jener Einwand dadurch widerlegt, daß man aus den far-

bigen Strahlen, die man aus dem Prisma hervorgehen sieht, das ursprüngliche weiße Sonnenlicht wieder herstellen kann.

3. Stellt man zwischen das Prisma und den Schirm eine Sammellinse, so wird das Spectrum wieder in einen hellen Kreis verwandelt. Stellt man hinter das erste Prisma ein zweites ganz gleiches in entgegengesetzter Lage, oder betrachtet man das farbige Spectrum durch ein zweites Prisma in geeigneter Lage, so erscheint das ursprünglich helle Sonnenbild wieder. Läßt man das Prisma durch eine mechanische Vorrichtung rasch oscilliren, so daß auch das Spectrum oscillirt, so erscheint es in der Mitte wieder weiß. Bringt man auf einer kreisförmigen Scheibe die 7 Farben sectorförmig in demselben Verhältnisse an, wie sie sich in dem Spectrum finden, so erscheint der Kreis bei rascher Drehung weiß (Farbenkreisel). Läßt man die 7 Farben auf 7 verschiedene Spiegel von solcher Stellung fallen, daß die Farben auf dieselbe Stelle einer Tafel reflectirt werden, so entsteht dort ein weißes Bild.

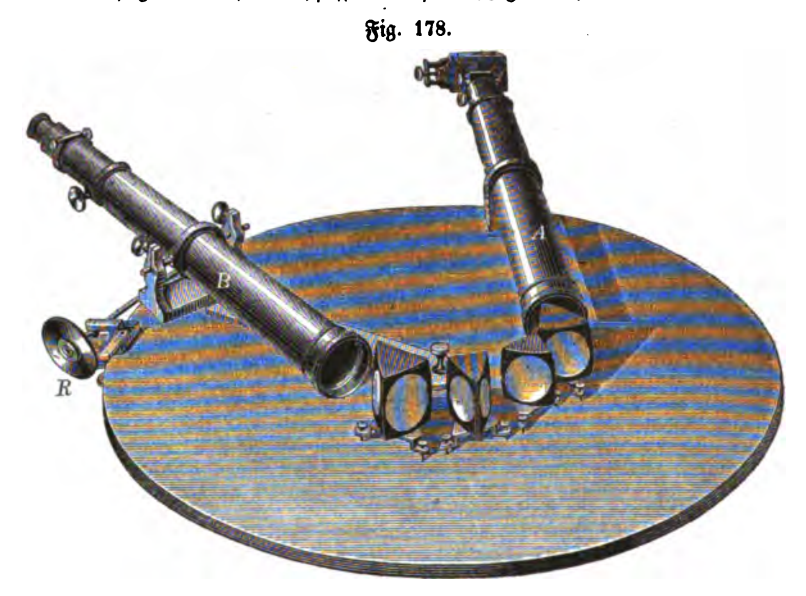
Daß die aus dem Prisma tretenden Strahlen eine verschiedene Richtung haben, kann man an ihrem Wege durch den dunkeln Zimmerraum wahrnehmen, wo die Luftstäubchen durch dieselben farbig beleuchtet sind. Geht man mit dem Schirme zu nahe an die Oeffnung, so erscheint das Spectrum weiß mit einem violetten Saume an dem einen und einem rothen am anderen Ende, weil sich zwischen beiden die Farben decken und vereinigen. Ebenso erscheint durch ein Prisma gesehen der Spalt sowohl wie jeder andere helle Raum ebenso hell und nur mit dem blauvioletten und dem rothgelben Saume versehen; denn die Spectra der zahllosen inneren Lichtpunkte eines hellen Raumes decken sich gegenseitig und vereinigen sich zu Weiß; nur am einen Rande bleiben die wenigstgebrochenen und am anderen die meistgebrochenen Farben ungedeckt.

Die eigenthümliche Form des auf die angeführte Weise erhaltenen Sonnenspectrums erklärt sich dadurch, daß die ursprünglich parallelen verschiedenfarbigen Sonnenstrahlen nach des prismatischen Brechung divergiren, und daß nur noch die gleichfarbigen parallel mit einander weiter laufen; jedes farbige Strahlenbündel erzeugt ein gleichfarbiges Sonnenbild auf dem Schirme; es entstehen daher so viele verschiedenfarbige Sonnenbilder, als verschiedene Schwingungszahlen in dem ursprünglichen Strahlenbündel enthalten waren. Die Mittelpunkte dieser farbigen Kreise liegen in einer geraden Linie, weil die Brechung der verschiedenen Strahlen nach einer und derselben Richtung hin stattfindet; daher bilden auch die Kreise seitlich eine geradlinige Begrenzung und lassen nur an den Enden zwei halbkreisförmige Krümmungen zurück. Daß wirklich das Spectrum aus einzelnen farbigen Kreisen besteht, kann man sehen, wenn man dasselbe durch ein mit Kupferoxyd roth gefärbtes Glas oder durch ein aus planparallelen Glasplatten gebildetes und mit Kupferammoniumsulfat gefülltes, dünnes Gefäß betrachtet; im ersten Falle sieht man nur einen rothen, im letzten einen blauen Kreis, weil das rothe Glas alle eintretenden Strahlen außer den rothen verschluckt, und weil die blaue Flüssigkeit ebenso nur die blauen Strahlen durchläßt. Wieviele solcher Sonnenbilder vorhanden sind, ist durch directe Beobachtung nicht wahrnehmbar. Newton unterschied 7 Farben, um eine Analogie des Sonnenlichtes mit den 7 Tönen der Octave aufstellen zu können. Helmholtz unterscheidet 10 Farben, nämlich außer den genannten 7 noch Goldgelb zwischen Orange und Gelb, Gelbgrün zwischen Gelb und Grün, Blaugrün zwischen Grün und Blau, und sieht bei der Anwendung von Quarzprismen auch jenseits des Violett, im sogenannten Ultraviolett, noch ein schwaches Lavendelgrau. Genauer betrachtet entstehen soviele Sonnenbilder, als auf das Auge wirksame Schwingungszahlen in dem Sonnenlichte enthalten sind, von denen diejenigen, die von nahe beisammen liegenden Schwingungszahlen herrühren, auch nahe beisammen liegen und sich daher theilweise decken. Folglich können in dem so erhaltenen Sonnenspectrum die einzelnen Farben nicht genau homogen sein; um genau homogenes Licht zu erhalten und um zu erproben, ob in dem Sonnenlichte keine Schwingungszahlen zwischen den angegebenen Grenzen fehlen, sowie auch für sonstige genauere Untersuchungen, ist eine andere Methode zur Bildung des Spectrums nothwendig.

Das reine Sonnenspectrum und die Fraunhofer'schen Linien (Fraunhofer 1814, Kirchhoff 1860). Man kann das reine Spectrum objectiv, in selbständiger Existenz für Viele gleichzeitig sichtbar, oder auch subjectiv, nur für den Beobachter vorhanden entwerfen. Die letztere Methode gibt die größte Genauigkeit. Fraunhofer stellte vor einem Fernrohre das Prisma auf und richtete das **311**

Fernrohr so, daß die durch einen schmalen Spalt im Fensterladen auf das Prisma fallenden und durch dasselbe gebrochenen Strahlen in die Achse des Fernrohres fielen. Noch genauer ist Kirchhoffs Methode (Fig. 178).

Fig. 178.



Das Rohr A trägt an seinem hinteren Ende eine Spaltvorrichtung, mittels welcher ein das Licht einlassender Spalt durch Schrauben bald schmal, bald breit gemacht werden kann. Die Sammellinse an dem vorderen sichtbaren Ende des Rohres hat eine solche Brennweite, daß der Spalt genau in dem Brennpunkte liegt, und daß demnach die aus der Linse tretenden Strahlen eines jeden Spaltpunktes und die Strahlen aller Spaltpunkte einander parallel sind. Hierdurch erhält das Bündel paralleler Strahlen die scharfe, schmale, linienartige Form des Spaltes. Dieses Strahlenbündel geht nun durch vier Flintglasprismen (bei Gassiot in Kew durch 9, bei Merz gar durch 11 Flintglasprismen, bei Cooke durch 9 Schwefelkohlenstoffprismen) und wird dadurch in so viele farbige Strahlenbündel von der Form und Größe des Spaltes zerlegt, als in dem Lichte des Bündels homogene Farben oder Schwingungszahlen combinirt waren. Je mehr die Schwingungszahlen von einander verschieden sind, desto weiter werden die betreffenden farbigen Strahlenbündel von einander entfernt sein; durch zwei eng neben einander liegende Schwingungszahlen werden auch zwei eng beisammen liegende Strahlenbündel entstehen; ist eine zwischen zwei Zahlen liegende Schwingungszahl nicht vorhanden, so wird auch zwischen den zwei jenen Zahlen entsprechenden Strahlenbündeln ein dunkler Raum vorhanden sein, der ebenfalls die Form des Spaltes hat. Läßt man nun die aus dem letzten Prisma austretende divergirende Lichtmasse in ein Fernrohr B treten, so wird man sowohl die dunkeln Zwischenräume, falls solche vorhanden sind, als auch die spaltförmigen Vorderflächen der einzelnen Strahlenbündel vergrößert sehen; jedes einzelne Strahlenbündel muß in der Form eines farbigen Streifens von der Gestalt des Spaltes erscheinen. Wenn die Schwingungszahlen ununterbrochen auf einander folgen, so muß auch ein Streifen sich unmittelbar an den anderen schließen, die Farben müssen unmerklich in einander übergehen, es muß ein continuirliches Spectrum entstehen, das die Form eines langgezogenen Bandes von der Breite der Spaltlänge besitzt; fehlen aber einzelne Schwingungszahlen, so muß das farbige Band von dunkeln Linien unterbrochen sein.

Richtet man nun die Spaltöffnung eines solchen (oder ähnlichen Apparates) auf weißglühende feste oder flüssige Körper, so erhält man ein continuirliches Spectrum: Weißglühende feste oder flüssige Körper enthalten daher alle Schwingungszahlen zwischen 400 und 800 Billionen. Richtet man die Spaltöffnung auf die Sonne oder einen Fixstern, so erhält man ein von dunkeln Linien durchzogenes

continuirliches Spectrum (Fig. 179): Das Licht der Sonne und der Fixsterne enthält zwar sehr viele Schwingungszahlen, doch fehlt innerhalb der angegebenen Grenzen eine beträchtliche Anzahl derselben. Wodurch dieselben verlöscht oder bis zur Dunkelheit geschwächt sind, wird später noch betrachtet werden.

Die dunkeln (zuerst von Wollaston 1802 in geringer Zahl wahrgenommenen) Linien des Sonnenspectrums werden Fraunhofer'sche Linien genannt, weil Fraunhofer sie zuerst (unabhängig von Wollaston) in größerer Anzahl beobachtete, ihre Lage gegen einander und gegen die Farben des Spectrums, sowie ihre Stärke feststellte und die hauptsächlichsten mit großen und kleinen Buchstaben des lateinischen Alphabetes benannte. Fraunhofer beobachtete etwa 500. Kirchhoff brachte die Zahl derselben bis über 3000 und gab höchst genaue Messungen ihrer Abstände in Millimetern von einem beliebig gewählten Anfangspunkte, Angström gab 1869 von vielen Linien die Wellenlänge des zugehörigen Lichtes in Zehnmilliontel Millimeter; so ist die Wellenlänge von $A = 7601$, $B = 6869$, $C = 6716$, $D_1 = 5899$, $D_2 = 5895$, $E = 5269$, $F = 4861$, $G = 4307$, $H_1 = 3968$, $H_2 = 3933$. Diese Linien bilden einen der wichtigsten Gegenstände der neueren Physik; denn sie sind für uns der Schlüssel zur Erkenntniß des Wesens der Sonne und der Fixsterne. Sie bieten einen Anhalt zur genauen Bestimmung der Brechungsexponenten; denn da bei dieser Bestimmung ein Prisma angewendet wird, so erscheint der untersuchte Strahl als Spectrum, bietet also nur durch die Fraunhofer'schen Linien bestimmte, scharfe Visirpunkte für die Beobachtung mit dem Fernrohre dar (301.).

312 **Die totale und die partielle Dispersion.** Das reine Spectrum ist für verschiedene Prismen aus derselben Substanz unter übrigens gleichen Umständen um so länger, je größer der brechende Winkel ist; die Breite der einzelnen Farbenstreifen nimmt in demselben Verhältnisse zu wie die Länge des ganzen Spectrums. Dies gilt jedoch nur für Prismen aus demselben Stoffe. Prismen von verschiedenem Stoffe erzeugen dagegen unter sonst gleichen Umständen Spectra von verschiedener Länge, haben also bei gleichem brechenden Winkel eine verschiedene Dispersion und bedürfen für gleiche Dispersion verschiedener brechenden Winkel. Man mißt die Dispersion durch die Differenz $n_v - n_r$, worin n_v den Brechungsexponent der äußersten violetten und n_r den der äußersten rothen Strahlen bezeichnet; man nennt diese Differenz die totale Dispersion und versteht unter der partiellen Dispersion die Differenz der Brechungsexponenten zweier anderen Farben des Spectrums. Die totale Dispersion ist im Allgemeinen größer bei stärker brechenden Substanzen, aber durchaus nicht dem Brechungsexponent proportional; ebenso ist die partielle Dispersion weder der totalen, noch dem Brechungsexponent proportional.

Ein Flintglasspectrum ist bei demselben brechenden Winkel doppelt so lang als ein Crownglasspectrum und dreimal so lang als ein Wasserspectrum; da Flintglas auch stärker bricht als Crownglas und dieses stärker als Wasser, so könnte die Meinung entstehen, daß die Dispersion regelmäßig mit der Brechung wachse; allein sie wächst in den 3 Substanzen durchaus nicht dem mittleren Brechungsexponenten proportional; ja es ist sogar das entgegengesetzte Verhalten beobachtet worden; Terpentinöl hat eine schwächere Brechung, aber eine stärkere Dispersion als Crownglas. Ebenso unregelmäßig verhält sich die partielle Dispersion; während das ganze Flintglasspectrum 3mal so lang als das Wasserspectrum ist, ist der rothe Theil des ersteren nur 2½ mal und der violette mehr als 4mal so lang als die gleichfarbigen Theile des Wasserspectrums. Wie überhaupt die stärker brechbaren Farben eine größere Ausdehnung im Spectrum haben, so wird auch im Allgemeinen das Verhältniß der partiellen Dispersionen für dieselben durchschnittlich größer; jedoch kommt auch das umgekehrte Verhalten vor, so daß überhaupt keine regelmäßige Beziehung zwischen der partiellen und totalen Dispersion erkennbar ist.

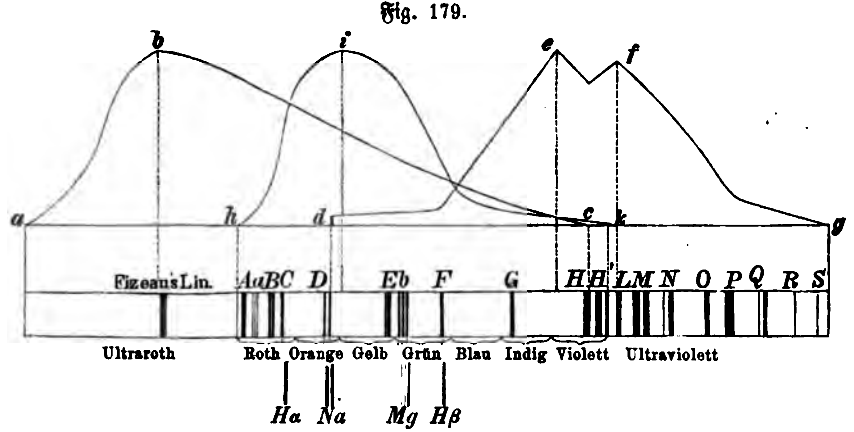
Bei gleichen brechenden Winkeln bricht das Flintglasprisma stärker als ein Wasserprisma, es hat ein 3 mal so langes Spectrum als dieses, das Roth ist im ersteren 2,5, das Gelb 2,8, das Violett 4mal breiter als im letzteren. Wenn man nun den brechenden Winkel des Wasserprismas so vergrößert, bis das Wasserspectrum dieselbe Länge wie das Flintglasspectrum besitzt, so hat das Wasserspectrum eine stärkere Ablenkung, Roth, Gelb und Orange haben eine größere und Violett eine kleinere Ausdehnung in diesem als im Flintglasspectrum; hierin ist die Unregelmäßigkeit deutlich ausgesprochen. Wir stehen hier wieder vor dem noch ganz unbekannten Einflusse der materiellen Verschiedenheit.

313 Das reine Spectrum hat nicht da seine Grenzen, wo es unserem Auge mit dem äußersten Roth zu beginnen und mit dem äußersten Violett zu endigen scheint; es gibt ultrarothe und ultraviolette Strahlen; die ersteren enthalten weniger als 400, die letzteren mehr als 800 Billionen Schwingungen, die ersteren sind dunkle Wärmestrahlen, die letzteren dunkle chemische Strahlen. Daß die ultrarothen Strahlen keinen Lichteindruck hervorbringen, suchte man nach Versuchen von Brücke (1845) dadurch zu erklären, daß die Häute und Flüssigkeiten des Auges diese Strahlen absorbiren; neuere Versuche von Janssen (1860) und Franz (1862) machen diese Erklärung zweifelhaft, und lassen dann nur die Annahme zu, daß die Netzhaut für die ultrarothen, sowie auch für die ultravioletten Strahlen unempfindlich sei. Indessen, wenn das Auge auch neben dem blendenden Glanze des leuchtenden Spectrums im ultrarothen und ultravioletten Theile keinen Lichteindruck wahrnimmt, so ist ein solcher Eindruck doch vorhanden, wenn man jenen blendenden Glanz beseitigt, wenn man den leuchtenden Theil des Spectrums abblendet; der ultraviolette Theil erscheint dann lavendelgrau, von dem ultrarothen Theile erscheint ein kleines Stück noch schwach roth mit demselben Tone wie das benachbarte abgeblendete Roth. Die Wärmewirkung des ultrarothen Theiles prüft man durch feine Thermometer, am Besten durch eine Thermosäule (s. 496.); doch muß man hierbei das Spectrum durch ein Steinsalzprisma erzeugen, weil Glas die dunkeln Wärmestrahlen absorbirt. Man findet dann die Wärmewirkung im ultrarothen Theile des Spectrums viel größer als in dem leuchtenden Theile und im ultravioletten Theile gleich Null. Man darf aber (nach Helmholtz) hieraus nicht schließen, daß in dem Sonnenlichte die dunkeln Wärmestrahlen in größerer Menge vorhanden seien, als irgend eine Art leuchtender Strahlen; die größere Wärmewirkung des ultrarothen Theiles kann davon herrühren, daß nach der mathematischen Theorie der Brechung die Strahlen in dem Spectrum um so mehr zusammengedrängt werden, je größer ihre Wellenlänge ist, wodurch sich auch die größere Breite der höheren Farben im Spectrum erklärt. Bis zu welchen Schwingungszahlen herab die dunkeln Wärmestrahlen der Sonne gehen, ist noch nicht mit aller Bestimmtheit erforscht. Fizeau gibt für die äußersten ultrarothen Strahlen die Wellenlänge 0,0019mm, J. Müller 0,0048mm; nach der letzten Angabe wäre die Schwingungszahl dieser Strahlen circa 60 Billionen, wonach, da das äußerste Roth die Schwingungszahl von 400 Bill. besitzt, fast 3 Octaven dunkler Wärmestrahlen gegen nur 1 Octave leuchtender Strahlen in dem Sonnenlichte vorhanden wären. Um die Wirkung des ultravioletten Spectraltheiles zu prüfen, muß man ein Quarzprisma anwenden, weil Glas diese Strahlen absorbirt; die chemische Wirkung derselben erfährt man aus der Menge von Chlor und Wasserstoff, die an den einzelnen Stellen des Spectrums zu Salzsäure verbunden werden oder an der Schwärzung von photographischem Papier; es ergibt sich dann, daß die chemische Wirkung schon bei der Linie E beginnt, rasch bis zur Linie H hin wächst und dann allmälig bis zum Ende des Spectrums abnimmt. Indessen haben nach Sachs (1865) auch die rothen und gelben Sonnenstrahlen die chemische Wirkung auf die Ernährung der Pflanzen (332.). Noch deutlicher werden die chemischen Strahlen durch die Fluorescenz, d. i. die Eigenschaft mancher Stoffe, bei besonders lebhaftem auftreffendem Lichte wie selbstleuchtend zu werden und ein Licht von veränderter Farbe auszustrahlen. Diese Eigenschaft zeigen in besonders hohem Grade Lösungen von Chininsulfat und Aesculin, Guajaktinktur, Steinöl, Uranglas, Bariumplatincyanür; betroffen werden von der Fluorescenz gerade vorwiegend die ultravioletten Strahlen, sie werden dadurch meist in ein sehr lebhaftes Blau verwandelt. Bringt man einen der genannten Stoffe in den ultravioletten Theil des Spectrums, so strahlt derselbe sofort ein lebhaftes farbiges Licht zurück, das wohl 1200 mal intensiver ist als das unveränderte Lavendelgrau im Ultraviolett. Da nach dem Princip der Erhaltung der Kraft die lebendige Kraft der Aetherschwingungen durch die Fluorescenz nicht vergrößert werden kann, und da die ultravioletten Strahlen nach Donders und Rees (1853) durch die Medien des Auges dringen können, so folgt aus der außerordentlich schwachen Sichtbarkeit des Lavendelgrau, daß die Netzhaut für die ultravioletten Strahlen fast unempfindlich ist. Helmholtz meint übrigens, daß das Lavendelgrau eine gemischte Empfindung sei, aus einem direct durch die ultravioletten Strahlen erzeugten schwachen Violett und einem durch Fluorescenz auf der Netzhaut hervorgerufenen Grünlichweiß. Bis zu welchen Schwingungszahlen hinauf das Ultraviolett des Sonnenspectrums sich erstreckt, ist noch nicht absolut genau anzugeben; man hat die Wellenlänge von einzelnen Linien L bis S zu bestimmen gesucht, welche analog den Fraunhofer'schen Linien keine chemische Wirkung hervorbringen, und die Wellenlänge der letzten = 0,0003mm gefunden, was einer Schwingungszahl von etwa 1000 Bill. entsprechen würde; demnach wäre der Umfang der chemischen Strahlen noch nicht ½ Octave. Indessen ist doch das ultraviolette Spectrum gewöhnlich sehr lang, fast so lang als das ultrarothe, das 3 Octaven umfaßt; dies rührt daher, daß nach der Theorie der Brechung, wie schon erwähnt, die brechbarsten Strahlen durch die Brechung am stärksten zerstreut werden, woher

sich auch erklärt, daß die niederen Farben des Spectrums einen kleineren Raum desselben erfüllen als die höheren. Noch länger ist der ultraviolette Theil des Spectrums des el. Funkens, des el. Kohlenlichtes und der Geißler'schen Röhren, ja nach Mascart ist das ultraviolette Spectrum des Cadmiumlichtes 6mal so lang als das des Sonnenlichtes.

Die ultrarothen (thermischen) Strahlen des Sonnenlichtes wurden von Herschel 1800 und die ultravioletten (chemischen) Strahlen von Ritter 1801 entdeckt. Indessen beschränkt sich die thermische Wirkung nicht ausschließlich auf die ultrarothen, und die chemische Wirkung nicht ausschließlich auf die ultravioletten Strahlen; vielmehr erstreckt sich die thermische Wirkung, aber mit abnehmender Stärke, bis zu dem Ende des leuchtenden Spectrums und die chemische Wirkung beginnt schon, aber sehr schwach im Orange. In Fig. 179 gibt

Fig. 179.



die Linie abc die thermische und die Linie defg die chemische Wirkungscurve; wie diese beiden Curven über dem Spectrum steigen und fallen, so verhält es sich auch mit den beiden Wirkungen; das Maximum der Wärmewirkung b fällt hiernach tief ins Ultraroth, die chemische Wirkung hat 2 Maxima, 1 im Violett bei e und 1 im Ultraviolett bei f. Indessen gilt die Wärmecurve nur für ein Steinsalzprisma und die chemische für ein Quarzprisma; mit anderen Prismen haben die Curven einen ganz anderen Verlauf, ja können sogar ganz wegfallen, weil die Strahlen absorbirt werden; die chemische Curve ist sogar verschieden nach den Stoffen, welche der chemischen Wirkung ausgesetzt sind. Auch die Lichtwirkung ist durch die Curve hik graphisch dargestellt; es ist aus derselben ersichtlich, daß das Maximum der Lichtwirkung ins Gelb fällt, woraus sich der leuchtende Glanz der Rapsfelder erklärt. In Fig. 179 sind außer den hauptsächlichsten Fraunhofer'schen Linien in dem Lichtspectrum auch die analogen Linien im Ultraviolett, chemisch wirkungslose Stellen, nach Müllers photographirtem Spectrum angegeben; ebenso im Ultraroth Fizeaus kalte Linie, eine Stelle, welche nach Fizeau keine Wärmewirkung zeigt und nach Becquerel die Phosphorescenz nicht verlöscht, wie dies das übrige Ultraroth thut. Endlich ist noch ersichtlich, welche der angegebenen Fraunhofer'schen Linien an derselben Stelle mit den Spectralstreifen irdischer Elemente stehen; C und F fallen zusammen mit 2 Hauptlinien des Wasserstoffspectrums Hα und Hβ, D mit der gelben Natriumlinie, b mit drei Magnesiumlinien.

Am weitesten im Studium der dunkeln Linien ist Henry Draper 1873 gekommen durch eine stark vergrößerte Alberttypie eines Beugungsspectrums (371.) Nach derselben besteht die Fraunhofer'sche Linie H aus 50 dunkeln Linien, L aus 25, und zwischen H und L hat die Photographie 138 Linien. Nach Draper ist die Wellenlänge von L 3819, M 3728, N 3583, O 3440 Zehnmilliontel Millimeter. — Am einfachsten werden die dunkeln Linien von H bis S sichtbar, wenn man nach Soret (1874) ein fluorescirendes Ocular in dem Spectralapparat anbringt, indem man in dem Brennpunkte der Fernrohrlinse eine Platte von Uranglas oder ein Chinin, Aesculin oder Magdalaroth enthaltendes Gefäß befestigt; die Fluorescenzfarbe erscheint dann von den dunkeln Linien durchbrochen.

Obwohl Newton das Wesen des Lichtes nicht in Schwingungen fand, kam er doch zu der Idee der 7 Farben nur deßhalb, weil er eine Analogie der Spectralfarben mit der phrygischen Tonleiter — $1 : {}^9/_8 : {}^6/_5 : {}^4/_3 : {}^3/_2 : {}^5/_3 : {}^{16}/_9$ — herstellen wollte; denn ein gewöhnliches, unbefangenes Auge unterscheidet in dem Spectrum wie in dem Regenbogen nur 5 Farben: Roth, Gelb, Grün, Blau und Violett. Helmholtz macht daher geltend,

daß Goldgelb, Gelbgrün und Blaugrün dasselbe Recht wie Orange und Indigo hätten; auch wies er darauf hin, daß die 2 Endfarben Roth und Violett sich in ihrem Tone wieder einander nähern, und daß daher, wenn man zwischen Roth und Violett noch Purpur einschaltet, die Farbenreihe einen Kreis bildet, auf dem man von einem beliebigen Anfangspunkte durch allmälige Uebergänge zu demselben zurückkehren könne. — Unger benutzte (1852) dieses Purpur zu einer Farbentonleiter, aus welcher er nach den Principien der Harmonie der Töne eine Farbenharmonie ableitete, um eine Grundlage für die Aesthetik der Farben zu gewinnen; so bilden in seiner allerdings etwas erzwungenen Farbentonleiter Roth, Grün und Violett den Dur-Dreiklang, wodurch sich die häufige Zusammenstellung dieser 3 Farben in den älteren, italienischen Gemälden erkläre, eine Erklärung, die Helmholtz bestreitet, da Roth, Grün, Indigo jenen Dreiklang bilde. — Listing stellte (1867) die Farbenoctave Braun (Ultraroth), Roth, Orange, Gelb, Grün, Cyan, Indigo, Lavendel auf und zeigte, daß die letzte Farbe doppelt soviel Schwingungen als die erste enthalte, und daß die Differenz je zweier auf einander folgenden Schwingungszahlen immer dieselbe = 48 Bill. sei. Die Farbenskala bilde demnach eine arithmetische Reihe, während die Tonskala einer geometrischen nahekomme; die Wellenlängen der Farben nehmen nach einer harmonischen Progression ab, die der Töne nach einer geometrischen Reihe. — Wie die Farben sich hinsichtlich der Schwingungszahlen unterscheiden, kann hier noch nicht berechnet werden; es möge einstweilen die Anführung genügen, daß Roth sich erstreckt von 400—470, Orange von 470—520, Gelb von 520—590, Grün von 590—650, Blau von 650—700, Indigo von 700—760, Violett von 760—800 Bill. Schwingungen. Warum die Strahlen innerhalb der angegebenen Grenzen einen nahezu gleichen Eindruck auf das Auge hervorbringen, ist noch nicht erklärt (s. Farbentheorie 329.).

Die Farbenzerlegung des Lichtes durch Brechung erklärt den Regenbogen und die großen Höfe (s. Physik d. Luft 596. u. 597.).

314 **Der Achromatismus** (Euler 1747, Dollond 1757). Betrachtet man eine weiße Fläche durch ein Prisma, so erscheint dieselbe an der einen Seite mit einem gelbrothen, an der anderen mit einem blauvioletten Saume versehen, in der Mitte aber weiß. Die Ursache dieser Erscheinung ist nach 310. die Dispersion. Um die farbigen Säume zu beseitigen, müßte man mit dem Prisma ein zweites aus gleichem Stoffe und mit gleichem brechenden Winkel so verbinden, daß die brechenden Winkel in entgegengesetzter Richtung liegen, da dann die Dispersion des einen Prismas durch die gleiche und entgegengesetzte des anderen aufgehoben wird und die farbigen Strahlen dann nicht mehr divergent sondern parallel austreten. In diesem Falle wird aber nicht blos die Dispersion, sondern auch die Ablenkung aufgehoben. Wenn die letztere Wirkung nicht erzielt werden soll, wenn noch eine Ablenkung vorhanden sein, die Dispersion aber gleich Null werden soll, so müssen die zwei Prismen gleich lange Spectra, aber verschiedene Ablenkungen bewirken; dies ist durch Verbindung zweier Prismen von verschiedenem Stoffe möglich, da solche Prismen bei gleichen brechenden Winkeln verschiedene Dispersionen und verschiedene Ablenkungen hervorbringen, die Dispersionen sich jedoch nicht den Ablenkungen proportional ändern. Läßt man den brechenden Winkel des Prismas mit kleinerer Dispersion so lange zunehmen bis ihre Spectra gleich sind, so heben sich die Dispersionen auf, die Ablenkungen aber nicht. Ein solches Prisma, aus zwei verschiedenen Prismen zusammengesetzt, das noch Ablenkung aber keine Dispersion besitzt, heißt *achromatisches Prisma*, und seine Eigenschaft, sowie die ganze Erscheinung wird *Achromatismus* oder *Achromasie* genannt.

Aus den Gesetzen der prismatischen Ablenkung läßt sich die Größe des brechenden Winkels B' berechnen, der entgegengesetzt mit dem brechenden Winkel B verbunden, die Dispersion aufhebt. Bekanntlich ist (300.) $\sin\alpha' = n \sin\beta' = n \sin(B-\beta) = n(\sin B \cos\beta - \cos B \sin\beta)$ und $\sin\beta = 1/n \sin\alpha$; $\cos\beta = \sqrt{(1-\sin^2\beta)} = 1/n \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)}$, woraus durch Substitution $\sin\alpha' = \sin B \sqrt{(n^2 - \sin^2\alpha)} - \cos B \sin\alpha$. Bezeichnen wir nun mit n_r, n_v, n'_r, n'_v die Brechungsexponenten der äußersten rothen und violetten Strahlen in beiden Prismen, mit α'' den Austrittswinkel aus dem zweiten Prisma, während α den Einfallswinkel ins erste und α' den Austrittswinkel aus dem ersten und den Einfallswinkel ins zweite bezeichnet, so ist für die violetten und die rothen Strahlen im zweiten Prisma bezüglich:

$$\sin \alpha''_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2 \alpha'_v)} - \cos B' \sin \alpha_v$$
$$\sin \alpha''_r = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2 \alpha'_r)} - \cos B' \sin \alpha'_r$$

Wenn die Dispersion schließlich = Null sein soll, so müssen die rothen und die violetten Strahlen am zweiten Prisma denselben Austrittswinkel haben, es muß $\sin \alpha''_v = \sin \alpha''_r$ sein; daher

$$\sin B' \sqrt{(n'^2_v - \sin^2 \alpha'_v)} - \cos B' \sin \alpha'_v = \sin B' \sqrt{(n'^2_r - \sin^2 \alpha'_r)} - \cos B' \sin \alpha'_r$$

oder $\operatorname{tang} B' \{ \sqrt{(n'^2_v - \sin^2 \alpha'_v)} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2 \alpha'_r)} \} = \sin \alpha'_v - \sin \alpha'_r.$

Setzen wir für $\sin \alpha'$ auf der rechten Seite den vorher gefundenen Werth, so ergibt sich

$$\operatorname{tang} B' = \frac{\sqrt{(n^2_v - \sin^2 \alpha)} - \sqrt{(n^2_r - \sin^2 \alpha)}}{\sqrt{(n'^2_v - \sin^2 \alpha_v')} - \sqrt{(n'^2_r - \sin^2 \alpha'_r)}} \sin B.$$

Hieraus kann man B' berechnen; ist z. B. für ein Crownglasprisma $B = 60$, $n_v = 1{,}55$, $n_r = 1{,}58$, für ein Flintglasprisma $n'_v = 1{,}67$, $n'_r = 1{,}63$, so ergibt sich $B' = 29^0$, vorausgesetzt, daß $\alpha = 50^0$ ist. Die Größe der bleibenden Ablenkung läßt sich nach der Formel $A = \alpha' + \alpha'' - B'$ berechnen.

Natürlich findet hier der Achromatismus nur unter der Voraussetzung $\alpha = 50^0$ statt, aber auch in diesem Falle ist er nicht absolut, weil die partiellen Dispersionen den totalen nicht proportional sind, also mit der Aufhebung der letzteren nicht vollkommen verschwinden.

Auch die Linsenbilder haben farbige Säume; denn aus der Formel $1/b + 1/d = (n - 1)(1/r + 1/r')$ folgt für die violetten Strahlen ein anderes und zwar ein kleineres b als für die rothen, da die Brechung nach dem Violett hin immer mehr zunimmt und daher $n_v > n_r$ ist. Es läßt sich dies durch den Versuch nachweisen, daß man ein Strahlenbündel durch eine Linse gehen läßt und den auf der anderen Seite entstehenden Lichtkegel auf einen Schirm treffen läßt; das kreisförmige Bild hat diesseits der mittleren Brennweite einen violetten, jenseits einen rothen Saum. Diese farbigen Säume zu beseitigen, ist eine der wichtigsten Aufgaben der praktischen Optik. Achromatische Linsen werden analog den achromatischen Prismen hergestellt, indem man mit einer biconvexen Linse eine biconcave von gleicher Dispersion aber anderer Ablenkung verbindet, deren Brennweite in ähnlicher Weise wie oben der brechende Winkel zu berechnen ist.

Die Spectral-Analyse (Bunsen und Kirchhoff 1860)*). Die Spectral-Analyse ist die Lehre von der Beschaffenheit der Spectra aller leuchtenden Körper. Es gibt vier Spectrum-Arten: 315

1. Das *continuirliche Spectrum* ist ein farbiges Band, dessen Farben ohne Unterbrechung in einander übergehen und nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch das Licht selbstleuchtender fester und flüssiger Körper.

2. Das *Streifen- oder Linienspectrum* besteht aus einzelnen farbigen Streifen oder Linien, die nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch das Licht glühender Dämpfe und leuchtender Gase in elementarem Zustande, die in dünnen Schichten oder in starker Verdünnung leuchten. Jedes andere Gas, jeder andere Dampf hat ein anderes Streifenspectrum; man kann daher ein Gas mittels seiner Spectralstreifen erkennen; das Streifenspectrum dient vorwiegend zur Spectralanalyse.

3. Das *Bandenspectrum* besteht aus breiten Farbenstreifen, die an Lichtstärke ab- und zunehmen und nach Newtons Reihe geordnet sind; es entsteht durch das Licht gas- oder dampfförmiger chemischer Verbindungen oder von solchen gasförmigen Elementen, die in dicken Schichten oder in verdichtetem Zustande leuchten.

4. Das *Absorptionsspectrum* ist ein solches Spectrum, dessen Continuität durch dunkle Linien unterbrochen ist. Es entsteht durch leuchtende feste oder flüssige Körper, die von einer weniger hellen Gashülle umgeben sind; die dunkeln Linien stehen an den Stellen, an welchen das Spectrum des Gases, wenn dieses selbstleuchtend wäre, helle Linien erhalten würde. Man kann daher an den dunkeln Linien die Elemente der Gashülle erkennen (324.). Auch entsteht ein

*) Da die Anführung aller Namen und Jahreszahlen die Darstellung in diesem Abschnitte wesentlich beeinträchtigen würde, so sind nur die wichtigsten aufgenommen worden.

Absorptionsspectrum durch das Licht, welches durch feste oder flüssige Körper gegangen oder von solchen reflectirt worden ist; die Continuität ist aber dann von breiten, dunkeln Banden oder Feldern unterbrochen.

Die 3 ersten Spectra werden zusammen auch Emmissionsspectra genannt, da die betreffenden Körper dabei selbst Licht ausstrahlen oder emmittiren; sie stehen hierdurch im Gegensatze zu den Absorptionsspectren, bei welchen die betreffenden Körper das von anderen emmittirte Licht theilweise verschlucken; man könnte diese auch in Linien- und Bandenabsorptionsspectra unterscheiden.

ad 1. Feste und flüssige glühende Körper enthalten im weißglühenden Zustande, wie schon in 280. und 308. entwickelt wurde, alle nur denkbaren Schwingungszahlen zwischen 100 bis 1000 Billionen Schwingungen, strahlen daher alle nur denkbaren Farben von Roth bis Violett aus, so daß in dem farbigen Band keine Lücke entstehen kann.

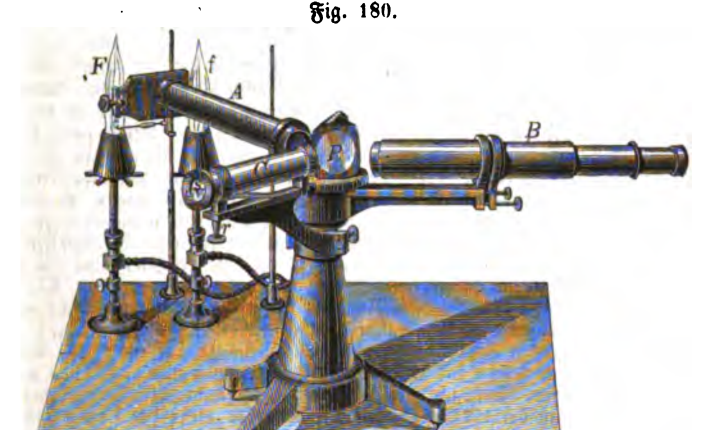
ad 2. Glühende Dämpfe und leuchtende Gase enthalten nur eine begrenzte Anzahl von Schwingungszahlen, da die Atome innerhalb eines Moleküls und die Moleküle gegen einander nur wenig verschiedene Lagen annehmen können; sie strahlen daher nur ein Gemisch von wenigen Farben aus; geht ein solches Strahlengemisch durch einen schmalen rechteckigen Spalt, dann durch ein Prisma, so kann das rechteckige Strahlenbündel nur in wenige farbige Bündel von gleicher Form zerlegt werden; folglich wird man, wenn das aus dem Prisma tretende Licht in ein Fernrohr oder direct ins Auge geleitet wird, nur wenige Streifen von der Form des rechteckigen Spaltes wahrnehmen; also besteht das Spectrum der leuchtenden Gase und glühenden Dämpfe aus farbigen Streifen. Jedoch ist diese Folgerung nur dann giltig, wenn so zu sagen nur wenige Moleküle leuchtend und innerhalb derselben nur wenige Atome vorhanden sind, also bei stark verdünnten und dünnen Schichten elementarer Gase; sonst nähert sich das Spectrum mehr dem continuirlichen, wird ein Bandenspectrum, ja geht sogar bei stärkster Dichte und höchster Temperatur in ein continuirliches Spectrum über.

Die Anzahl und Farbe der Spectrallinien auf dem langen Spectralbande der 7 Farben kann eine unendliche Verschiedenheit von Liniengruppen darbieten; daher ist es wohl denkbar, daß jedes Gas sein eigenes von allen anderen wohl unterscheidbares Spectrum besitzt, und daß daher ein Gas an seinem Spectrum erkannt werden kann. So strahlt glühender Natriumdampf nur eine Schwingungszahl, ein homogenes Gelb von ca. 5.. Bill. Schw. aus; daher besteht das Spectrum des Natriumdampfes aus einem gelben Streifen, der beiläufig gesagt an derselben Stelle des Spectrums steht, wo sich im Sonnenspectrum die dunkle Linie D befindet. Enthält umgekehrt das Spectrum eines Dampfes an der Stelle der Fraunhofer'schen Linie D eine gelbe Linie, so kann man behaupten, daß der Dampf Natrium enthalte. Diese Methode, Dämpfe zu erkennen, die eigentliche Spectral-Analyse, ist deßhalb von so besonderer Wichtigkeit, weil sie so geringe Stoffmengen zu erkennen vermag, wie sie durch kein anderes chemisches Mittel nachgewiesen werden können; schon 1/40,000,000 Gramm Kochsalz gibt die gelbe Linie; daher ist dieselbe in jedem Spectralapparat, weil das Kochsalz allverbreitet ist, immer sichtbar. Wegen der hohen Bedeutung der Spectral-Analyse haben die Spectral-Apparate oder Spectroskope die mannichfaltigsten Einrichtungen erhalten.

Wir beschreiben einen solchen Apparat von Kirchhoff und Bunsen (Fig. 180), wie er zu genaueren chemischen Untersuchungen gebraucht wird. Zur Erzeugung der Dämpfe benutzt man einen Bunsen'schen Gasbrenner. In diesem endigt das Gasleitungsrohr mit einer feinen, dreispaltigen Oeffnung; dieses Ende ist von einem 4seitigen Kästchen umschlossen, das in jeder Seite eine große Oeffnung zum Einströmen von Luft hat, und in dessen obere Mündung eine Röhre eingeschraubt wird. In dieser Röhre mischen sich Gas und Luft, so daß jedes Kohlentheilchen hinreichend Sauerstoff neben sich findet, um sofort zu Kohlendioxyd zu verbrennen; deßhalb hat die Bunsen'sche Gasflamme eine hohe Hitze, aber nur eine äußerst geringe Leuchtkraft. Das Spectrum derselben, wie alle Flammenspectren continuirlich, ist zwar noch merklich, aber sehr schwach. Hält man in den Rand dieser Flamme mittels eines Platindrahtöhrs eine Salzperle, so entsteht rasch eine Verdampfung derselben. Das Salz wird in seine Elemente zersetzt, und der Metalldampf glüht in der Flamme, ertheilt derselben häufig charakteristische Farben, die ebenfalls schon, aber als unsicheres Erkennungsmittel dienen können. Auf eine solche Flamme F wird nun das Spaltrohr A gerichtet, das an dem der Flamme zugewandten Ende eine Spaltvorrichtung (siehe Fig. 181) trägt, an welcher mittels einer Schraube der Spalt nach Belieben breiter oder schmäler gemacht werden kann; das andere Ende trägt eine Linse, in deren Brennpunkt sich der Spalt befindet. Das durch den Spalt eingetretene und durch die Linse concentrirte Strahlenbündel fällt nun auf das Prisma P, wird dadurch in seine Farben

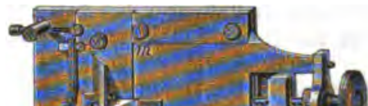
zerlegt und in das Fernrohr B hineingebrochen, wodurch es zerlegt zu dem in das Fern-
rohr blickende Auge gelangt und für dieses zu einem vergrößerten Spectrum wird. Das
dritte Rohr C enthält an seinem Ende S eine Millimeterskala auf einer Glasplatte, die
von 2 Stanniolplatten so bedeckt ist, daß ein schmaler Streifen offen bleibt, der von einer

Fig. 180.



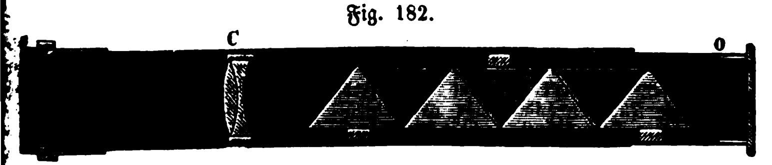
einen Flamme von außen beleuchtet wird. Die Skala findet sich in dem Brennpunkte
der am anderen Ende des Rohres C eingesetzten Linse; das Rohr hat eine solche Stellung
gen die Vorderfläche des Prismas P, daß durch das Fernrohr B die Skala vergrößert
gleichzeitig mit dem Spectrum gesehen wird. Hierdurch hat man einen scharfen Anhalt
für eine genaue Erkennung der Spectrallinien. In Fig. 181 ist die Spaltvorrichtung des
Spaltrohres abgebildet. Man bemerkt an der-
selben das Vergleichprisma ab, welches ver-
hindert, daß durch den unteren Theil des Spaltes
Strahlen der Flamme F in das Rohr treten,
während solche oben ungehindert eindringen; da-
gegen gelangen durch das Vergleichprisma mittels
der Reflexion Strahlen der Flamme f in das
Rohr. Zweifelt man nun, ob einige von der
Flamme F herrührenden Linien einem bestimmten
Stoffe angehören, so hält man eine Perle des-
selben Stoffes in die Flamme f und löst dann
erst durch Vergleichung der zwei Spectra seine
Zweifel. Auch kann man mit Hilfe des Vergleichprismas das Spectrum jeder Flamme
mit dem Sonnenspectrum vergleichen, indem man durch den oberen Theil des Spaltes
Sonnenlicht, durch den unteren aber das Licht der Flamme f in das Rohr treten läßt.

Fig. 181.



Viel Ausbreitung haben in der letzten Zeit die gradsichtigen Taschenspectro-
skope (à vision directe) gefunden. Wie man Prismen so verbinden kann, daß die Dis-
persion aufgehoben wird, aber die Ablenkung bleibt, so kann man auch Prismen so ver-
binden, daß die Dispersion bleibt, aber die Ablenkung aufgehoben wird. Durch eine solche

Fig. 182.



Prismenverbindung sieht man einen Lichtpunkt unverrückt an seiner Stelle, sein Licht ist
aber in ein Spectrum zerlegt. Darauf beruht Brownings Taschenspectroskop, das in
Fig. 182 in wahrer Größe und im Längsdurchschnitt dargestellt ist. P ist der aus 7 Pris-

men zusammengesetzte Prismenkörper, C die Collimatorlinse, in deren Brennpunkt sich der Spalt s befindet, der mit dem ansitzenden Rohre sich aus dem Prismenrohr ausziehen und zusammenschieben läßt; O ist eine Oeffnung für's Auge. Die älteren Browning'schen Taschenspectroskope sind zwar lichtstark und so scharf, daß man die Fraunhofer'schen Linien durch dieselben sehen kann; jedoch ist die Dispersion derselben gering, und das Spectrum bricht vor seiner sichtbaren Grenze im Blau ab, so daß man die violette Kaliumlinie nicht sehen kann. Hilger (1877) hat durch Prismensätze von starker Dispersion diesen Mangel beseitigt und die Schärfe bedeutend erhöht, indem er statt der Collimatorlinse eine Cylinderlinse einsetzte und noch ein achromatisches Ocular zwischen Prisma und Auge zufügte. Trotz dieser Vervollkommnungen kosten die Hilger'schen Spectroskope nur 35 bis 40 Mark.

ad 3. Das Bandenspectrum enthält helle farbige Stellen, welche ganz allmälig an Helligkeit abnehmen und fast in Dunkelheit übergehen, wonach oft plötzlich die neben der dunkeln Stelle befindliche Farbe wieder hervortritt; diese einzelnen schattirten Felder machen den Eindruck von nebeneinander aufgerichteten Cannelirungen. Dieses Spectrum steht offenbar zwischen dem continuirlichen und dem Streifenspectrum, sowie auch zwischen dem continuirlichen und dem Absorptionsspectrum; es findet sich auch bei Stoffen, die als chemische Verbindungen eine größere Verdichtung der Atome besitzen, aber als Gase doch kein continuirliches Spectrum haben, sowie auch bei dichten elementaren Dämpfen, die durch ihre Dichte sich mehr dem flüssigen Zustande nähern. Es ist noch nicht erklärt, wie dieses Spectrum entsteht; auch ist sein Auftreten noch nicht durchgängig erkannt, und zwar deßhalb, weil in der großen Hitze, die für das Selbstleuchten der Gase und Dämpfe angewendet werden muß, dieselben sich in ihre Elemente zersetzen und verdünnen und so das Streifenspectrum erzeugen. Deßhalb gelangt man für die chemischen Verbindungen immer mehr zu der Ansicht, daß bei der Spectralanalyse derselben mehr das Absorptionsspectrum als das Emmissionsspectrum zu benutzen ist, da jenes für jede niedere Temperatur hervorgerufen werden kann.

ad 4. Wir haben das Absorptionsspectrum der Vollständigkeit wegen angeführt; doch kann seine Entstehung erst nach der Betrachtung der Absorption verstanden werden.

316 **Spectralia.** Wenn auch jedem Stoffe, jeder chemischen Verbindung und jedem Element, ein ganz bestimmtes Spectrum eigenthümlich ist, so ändert sich doch das Spectrum schon mit dem Aggregatzustande; außerdem ist allgemein anerkannt, daß mit der Vervollkommnung der Apparate und mit der Aenderung der Temperatur eine Aenderung des Spectrums eintritt, und wenn nicht eine Aenderung des Charakters des ganzen Spectrums, so doch eine Aenderung der Zahl der Linien und Banden und zwar der Art, daß mit der Annäherung der Moleküle die Anzahl der Linien und Banden wächst.

Schon wegen der Verschiedenheit der Spectra nach dem Stoffe und dessen Zustande ist die Zahl der Spectra außerordentlich groß und daher die Literatur der Spectral-Analyse zu ganzen Bänden angeschwollen. Wir wollen die wesentlichsten Resultate kurz angeben:

317 a. **Glühende feste und flüssige Körper.** Das Spectrum ändert sich mit der Höhe der Gluth; nur weißglühende Körper haben alle 7 Farben des Spectrums, z. B. ein weißglühender Platindraht. In dem der gelbglühenden fehlt schon das blauviolette Ende; das Spectrum der rothglühenden erstreckt sich höchstens bis zum Orange; bei steigender Temperatur gesellen sich immer mehr Farben hinzu, während die Intensität der niederen Farben wächst. Johanniswürmchen und im Dunkeln leuchtender Phosphor zeigen geringe Intensität im Blau und Violett, das Spectrum des Leuchtkäfers liegt ganz zwischen C und F, enthält weder dunkle Wärmestrahlen, noch Roth, weder Blau, Violett, noch chemische Strahlen. Glühende Erbinerde und mit Phosphorsäure getränktes Didymoxyd sind dadurch höchst interessante Ausnahmen, daß sie ein Streifenspectrum haben.

318 b. **Flammenspectra.** Die gewöhnlichen Flammen erhalten bekanntlich ihre Leuchtkraft durch die festen Kohlentheilchen, die roth- bis weißglühend, je nach der Temperatur, in dem aufsteigenden, heißen Gasstrome der Flamme schweben; dem entsprechend ist ihr Spectrum ein continuirliches, dem bei rothen Flammen die höheren Farben fehlen; manchmal herrscht eine Farbe besonders vor oder enthält stärker leuchtende Streifen. So hat die Phosphorflamme besondere Intensität im Grün, wie auch die Gluthwolke des Zinklichtes; das Magnesiumlicht ist reich an blauen, violetten und ultravioletten Strahlen, der Schwefelflamme fehlt das Roth gänzlich. Auch die Wasserstoffflamme, wie auch die Bunsen'sche Gasflamme haben ein continuirliches Spectrum, wenn auch von großer Schwäche, wodurch man im Stande ist, die Streifen der in einer solchen Flamme schwebenden Metalldämpfe

nach ihrer Stellung annähernd abzuschätzen. Der untere blaue Kegel der Bunsen'schen Flamme, wie auch anderer gewöhnlichen Flammen, hat ein Dreibandenspectrum, aus drei verwaschenen Streifen im Gelbgrün, Blaugrün und Blauviolett bestehend, die man auch in dem sonst continuirlichen Spectrum der Kohlenoxydflamme wahrnahm. Als man ein ähnliches Dreibandenspectrum in den Flammen vieler Kohlenwasserstoffe wie auch anderer Kohlenstoffverbindungen auffand, und dasselbe auch bei solchen Kohlenwasserstoffen beobachtete, die in Geißler'schen Röhren eingeschlossen durch den Ruhmkorff'schen Funkenstrom zum Leuchten gebracht waren, neigte man zu der Ansicht, es sei das Spectrum des hypothetischen Kohlenstoffdampfes. Da indessen zu große Verschiedenheiten bei der Beobachtung der Spectra verschiedener Kohlenstoffverbindungen auftraten, und da die angewendeten Hitzegrade wohl kaum zur Bildung von Kohlenstoffdampf ausreichen können, so hält man jetzt das Dreibandenspectrum für das charakteristische Spectrum der Kohlenstoffverbindungen, wobei seine Verschiedenheiten durch die Verschiedenheit der Verbindungen erklärt und nothwendig sind. Indessen wäre es doch immerhin möglich, daß in dem untersten Theile eines Flammenkegels, wo sich der Kohlenstoff Atom für Atom aus den Verbrennungsgasen ausscheidet, dampfförmiger Kohlenstoff vorhanden sei und daß demnach eines der Dreibandenspectra demselben angehöre.

c. **Dampf- und Gasspectra.** Die Spectra der glühenden Metalldämpfe hat man nicht nur mittels der Bunsen'schen Gasflamme oder der Knallgasflamme, sondern auch nach anderen Methoden untersucht. Man bildete die Poldrahtenden eines elektrischen Stromes aus dem betreffenden Metall, dann mußte der Funkenstrom zwischen den beiden Polen aus feinsten Metalltheilchen in glühendem Zustande bestehen; man tauchte den einen Poldraht eines elektrischen Stromes in eine Salzlösung des betreffenden Metalls und brachte den anderen Pol nahe an die Oberfläche der Lösung; man befestigte an die beiden Pole Kohlenstifte und legte in ein Grübchen der einen Kohlenspitze ein Kügelchen des Metalls; man leitete Wasserstoff über die erhitzten Stoffe und zündete dann dieses Gas an. In allen Fällen erhielt man für dasselbe Metall immer dieselben Spectralstreifen, und durfte darum als Gesetz aussprechen, daß jeder glühende Metalldampf sein bestimmtes Spectrum habe. Natriumdampf zeigte immer den gelben Streifen, Kaliumdampf eine dunkelrothe und eine violette Linie, Strontiumdampf mehrere rothe Streifen, einen orangefarbigen und einen blauen Streifen. Nicht immer aber sind die Dampfspectra so einfach; schon die Metalle der alkalischen Erden haben verwickeltere Spectra, bei den schweren Metallen erhebt sich die Linienzahl über 100 und steigt bei dem Eisen fast bis zu Tausend. Je schärfer der Apparat, je mehr Prismen vorhanden sind und je besser das Fernrohr ist, desto höher steigt die Linienzahl; so löst sich in einem guten Apparat die gelbe Natriumlinie in 2 Linien auf. Auch mit der Temperatur steigt die Linienzahl; Lithiumdampf in der Bunsen'schen Gasflamme hat nur eine pfirsichblüthrothe Linie, in der Wasserstoffflamme tritt noch eine orangefarbige und in der Knallgasflamme noch eine blaue Linie hinzu; ebenso vermehrt sich die Zahl der Natriumlinien, wenn in die Bunsen'sche Flamme reiner Sauerstoff geleitet wird, und bei Anwendung der Knallgasflamme geht das Natriumspectrum in ein continuirliches über, was überhaupt bei hinreichender Temperaturerhöhung für jedes Streifenspectrum einzutreten scheint.. Die bei Erhöhung der Temperatur neu auftretenden und bei Erniedrigung wieder verschwindenden Linien sind nicht von gleicher Länge mit einander und mit den alten; die kürzesten verschwinden bei der Temperaturabnahme zuerst. Wahrscheinlich beruht der Einfluß der Temperatur wenigstens theilweise darauf, daß eine größere Menge von Dampftheilchen entsteht und die hierdurch bewirkte Verdichtung oder größere Annäherung der Moleküle die Linienzahl vergrößert; anderentheils kann er jedoch auch in der Erzeugung neuer Schwingungszahlen durch die höhere Temperatur beruhen. Die Dämpfe chemischer Verbindungen ergeben, wie sich wegen der Schwierigkeit der Untersuchung nur allmälig herausstellt, ein Bandenspectrum. Die Dämpfe von nicht metallischen Elementen z. B. von Jod und Schwefel haben ein Bandenspectrum, wenn sie bei weniger hoher Temperatur mehr im Dampfzustande sind, und ein Linienspectrum, wenn sie bei höherer Temperatur sich mehr dem Gaszustande nähern.

319

Die farblosen, durchsichtigen Gase, wie Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff lassen sich nicht in der Bunsen'schen Flamme leuchtend machen; trotzdem waren ihre Spectra schon vor der Erfindung der Spectralanalyse durch Plücker (1858) aufgefunden worden, nach einer Methode, die man jetzt noch und ganz allgemein für alle Gase und Dämpfe anwendet. Man schließt sie nämlich sehr stark verdünnt in die sogenannten Geißler'schen Röhren ein und leitet durch dieselben einen elektrischen Funkenstrom, entweder mittels des Ruhmkorff'schen Funkeninductors oder der Holtz'schen Elektrisirmaschine; hierdurch werden die Gase leuchtend und in einem capillardünnen Theile der Röhre besonders hellleuchtend; richtet man auf denselben den Spalt des Spectralapparates, so sieht man die Spectrallinien der Gase. In dieser Weise fand man, daß der Wasserstoff ein sehr einfaches Spectrum besitzt,

eine rothe Linie $H\alpha$, eine blaugrüne $H\beta$, und eine blauviolette $H\gamma$, von denen die zwei ersteren mit den Fraunhofer'schen Linien C und F zusammenfallen und die letztere nahe bei G steht. Verwickelter schon ist das Sauerstoffspectrum; außer mehreren schwächeren Linien enthält es 7 helle, die stärkste $O\alpha$ im Roth, die 2 nächsten $O\beta$ und $O\gamma$ im Grün; der Stickstoff ergab auffälliger Weise bei diesen Versuchen ein prächtiges Bandenspectrum. Da diese Gase die wichtigsten und verbreitetsten sind und der Wasserstoff durch die Uebereinstimmung seiner Streifen mit Fraunhofer'schen Linien eine hohe Bedeutung für die Sonne gewann, so wurden die Spectra derselben unter möglichst vielen Umständen untersucht, aber nicht ganz gleiche Resultate gewonnen. Während Plücker und Hittorf für diese und andere Gase bald ein Banden- bald ein Linienspectrum wahrnahmen und darnach ein Spectrum erster Ordnung (Bandenspectrum) und ein Spectrum zweiter Ordnung (Linienspectrum) unterschieden, während Wüllner für manche Gase sogar 4 verschiedene Spectra aufstellte, bleiben andere Physiker wie Angström und Thalén bei der Meinung, daß jedes Streifenspectrum seinen wesentlichen Charakter unverändert beibehalte; höchstens könnten bei starker Spannung die Linien sich verbreitern und in ein continuirliches Spectrum zusammenfließen. Mit diesem letzten Zugeständnisse wird zugegeben, daß ein Gas außer seinem Streifenspectrum im Zustande größerer Verdichtung ein continuirliches Spectrum haben könne, was auch durch die Frankland'sche Beobachtung geboten ist, nach welcher die mit reinem Sauerstoff genährte Wasserstoffflamme unter höherem als dem Atmosphärendruck weißglühend wird und ein continuirliches Spectrum erzeugt. Wüllner bleibt aber auch in seinen neuesten Arbeiten bei dem Satze, daß die Gase ein Streifenspectrum und ein Bandenspectrum erzeugen könnten, und glaubt durch seine Versuche dargethan zu haben, daß das Streifenspectrum bei der eigentlichen Funkenentladung stattfinde, wo der elektrische Funkenstrom nur durch eine äußerste dünne Schicht, so zu sagen nur durch eine Molekülreihe gehe, während das Bandenspectrum auftrete, wenn eine dickere Schicht, der ganze Inhalt einer Röhre, durch das Büschellicht oder die funkenlose Entladung in leuchtenden Zustand versetzt würde; jedoch ist auch diese Meinung nicht ohne Widerspruch geblieben. Helmholtz meint, das Streifenspectrum der Elemente trete auf, wenn ein Gas in seine Atome aufgelöst sei, das Bandenspectrum aber, wenn es in Molekülen schwinge; dies scheint mit Wüllners Beobachtungen, sowie mit der Ansicht zu stimmen, daß die Moleküle der Elemente chemische Verbindungen ihrer Atome seien, und daß die allotropischen Modificationen sich nur in der Atomzahl der Moleküle unterscheiden, wodurch die Verschiedenheit ihrer Spectra erklärlich wird.

320 d. **Spectra der Himmelslichter.** Die Sonne und die Fixsterne (Huggins u. Secchi) haben Absorptionsspectra; Kirchhoff schloß hieraus zuerst, daß sie feste oder flüssige glühende Körper, von einer Dampfhülle umgeben, seien; später sind Einige von diesem Schlusse abgegangen, weil auch Gase, wie wir so eben hörten, ein continuirliches Spectrum haben können. Die rosenfarbigen Hervorragungen am Sonnenrande bei einer totalen Sonnenfinsterniß, die sogenannten Protuberanzen wie auch die Corona haben ein Streifenspectrum; sie sind daher glühende Gasmassen, hauptsächlich aus Wasserstoff bestehend. Bei manchen veränderlichen Sternen sind im Zustande des höchsten Glanzes, ebenso wie bei dem neu am 15. Mai 1866 in der nördlichen Krone erschienenen Sterne, die Linien des Wasserstoffs von hervorragender Helligkeit; es finden also auf anderen Sternen noch gewaltigere Ausbrüche von glühendem Wasserstoff statt als auf unserer Sonne. Von den Nebelflecken haben die meisten auflöslichen und auflöslich scheinenden, wie die Sternhaufen continuirliche Spectra, wodurch ihre Identität mit Sternhaufen bestätigt wird; die nicht ausflösbaren haben theils continuirliche, theils Streifenspectra; besonders befinden sich die letzteren bei den planetarischen Nebeln; diese bestehen demnach aus Gasmassen.

Die Planeten haben das Sonnenspectrum, jedoch erscheinen viele Linien stark verbreitert; außerdem bemerkt man bei manchen Absorptionsstreifen, wie sie im Sonnenspectrum bei tiefem Sonnenstande wahrgenommen werden, wodurch das Vorhandensein dichter Atmosphären angedeutet wird; das Uranusspectrum besteht fast ganz aus matten Absorptionsstreifen; das Mondspectrum hat dieselben nicht, was auf Abwesenheit einer Atmosphäre gedeutet wird. Die Kometen haben für ihren Kern ein continuirliches Spectrum, für die Nebelhülle und den Schweif das Dreibandenspectrum der Kohlenstoffverbindungen; ersteres deutet auf feste Beschaffenheit des Kernes, letzteres auf gasförmige Beschaffenheit des Schweifes. Die Sternschnuppen haben nach Browning ein continuirliches Spectrum; die Schweife der Augustmeteoriten zeigten die helle Natriumlinie.

321 e. **Spectrum des elektrischen Lichtes und des Blitzes.** Das elektrische Licht erscheint als Funke d. i. als springender Lichtpunkt mehr oder weniger weiß, als Büschellicht d. i. in sprühenden Strahlenlinien roth bis violett, und als ruhig schwebendes Glimmlicht violett bis bläulich. Das Spectrum des elektrischen Funkens ist ein Linienspectrum, veränderlich nach dem Stoffe des Mediums, durch welches der Funke geht, und nach dem

Stoffe des Körpers, von welchem der Blitz kommt; in der Luft zeigt der elektrische Funke die Stickstofflinien. Das Spectrum des Büschellichtes und des Glimmlichtes besteht aus blauen und violetten Banden, wie sie das Stickstoffspectrum erster Ordnung zeigt (Schimkow 1866). Aehnliches zeigt sich in dem Spectrum der Blitze; die mit einem Donnerschlag verbundenen weißen Zickzackblitze haben ein Linienspectrum, die mit Prasseln begleiteten rothen und violetten Flächenblitze ein Bandenspectrum; man schließt hieraus, daß die Zickzackblitze von Funken zur Erde, die Flächenblitze von Büschellicht zu Wolken herrühren. Der Zahl nach verhalten sich die ersteren zu den letzteren etwa wie 6 : 11. (Kundt 1868).

f. **Spectrum des Nordlichtes und des Zodiakallichtes.** Angström fand 1868 in dem Nordlichtspectrum nur eine einzige grüngelbe Linie, die mit keiner bekannten coincidirt; Vogel fand 1871 außer dieser scharfen grüngelben Linie noch mehrere verwaschene grüne und blaue Streifen in den gelben Nordlichtstrahlen, dagegen in den rothen Strahlen auch einen rothen Streifen, und glaubte eine Coincidenz dieser Linien und Streifen mit denen des Stickstoffs höchster Verdünnung annehmen zu dürfen. Angström aber erklärte in seiner letzten Arbeit (1874), daß die charakteristische grüngelbe Nordlichtlinie mit keiner bekannten zusammenfalle; vielleicht könne sie durch Phosphorescenz oder Fluorescenz entstehen; das elektrische Licht des Nordlichtes möge viele ultraviolette Strahlen enthalten, welche den Sauerstoff oder Stickoxydul zum Selbstleuchten bringen könnten; dafür spreche auch, daß diese Linie bei rothem Nordlicht gleichzeitig mit den blauen und violetten Banden schwächer werde, indem solches durch Entladung in niederen Luftschichten entstehe, die den Wasserstoff leuchtend mache. Die Banden oder verwaschenen Streifen gehören dem elektrischen Lichte verdünnter wasserdampfhaltiger Luft an, was Angström nachwies, indem er durch eine weite ausgepumpte Flasche einen Ruhmkorff'schen Funkenstrom leitete. — Angström fand dieselbe grüngelbe Linie im Spectrum des Zodiakallichtes.

Zerlegung des Lichtes durch Absorption (Kirchhoff 1860, Lommel 1871.) **322** Wenn die Aetherwellen des Lichtes an einem neuen Medium anlangen, so kann es vorkommen, daß Schwingungen der Aetheratome auf Körpermoleküle übergehen, in ähnlicher Weise, wie die Schallschwingungen der Luft sich z. B. auf eine Saite übertragen und dieselbe zum Mittönen bewegen. Werden die Aetherschwingungen hierbei in Molekülschwingungen von geringerer Zahl verwandelt, so daß an Stelle der verschwindenden leuchtenden Strahlen dunkle Körperwärme entsteht, so wird die Erscheinung Absorption im engeren Sinne genannt. Werden aber die Körpermoleküle zu so hohen und starken Schwingungszahlen angeregt, daß der Körper selbstleuchtend wird, so heißt die Erscheinung, falls sie mit der Bestrahlung beginnt und endigt, also der Resonanz analog ist, Fluorescenz, falls sie dagegen erst allmälig durch Bestrahlung entsteht und erst nach derselben verlischt, also dem Mittönen analog ist, Phosphorescenz. Entsteht das Leuchten von Körpern durch dunkle Wärmestrahlen, so heißt die Erscheinung Calcescenz. Diejenigen Strahlen, welche nicht absorbirt werden, gehen entweder durch den Körper oder werden reflectirt, und ertheilen hierdurch dem Körper seine Eigenfarbe; da dieselbe nur einen Theil des auftreffenden Lichtes enthält, so ist mit der Absorption eine Farbenzerlegung verbunden. Welche Strahlen oder Schwingungszahlen ein Körper absorbirt, das hängt von den Schwingungszahlen ab, die er selbst schon enthält; er absorbirt die Strahlen, welche dieselben Schwingungszahlen wie seine eigenen Moleküle enthalten. Es ist dies ein specieller Fall eines allgemeinen von Kirchhoff aufgefundenen Absorptionsgesetzes; dasselbe hat indeß von Lommel die Erweiterung erfahren, daß ein Körper nicht blos seine eigenen Schwingungszahlen, sondern auch deren höhere und tiefere Octaven absorbiren könne; die erstere Absorption nennt Lommel die directe, die letztere die indirecte Absorption.

Wie nämlich tönende Schwingungen der Luft nur dann eine Saite zum Mittönen erregen, wenn dieselbe auf den betreffenden Ton abgestimmt ist, so können auch Aetherschwingungen nur auf Moleküle übergehen, wenn dieselben auf die betreffende Schwingungszahl abgestimmt sind, oder besser gesagt, da die Moleküle der Körper schon in Schwingungen begriffen sind, wenn sie die betreffende Schwingungszahl enthalten. Denn in diesem Falle können die Aetherschwingungen die Molekülschwingungen verstärken und dadurch vorher unendlich kleine und daher unwirksame Amplituden meßbar groß und daher wirksam

machen; die geringe lebendige Kraft eines Aetheratoms kann nämlich nur dann auf ein Molekül wirken, wenn es demselben nach jeder Schwingung einen Stoß versetzen kann, wenn also seine Periode mit der des Moleküls übereinstimmt. Ist aber z. B. die Schwingungsdauer des Atoms etwas kleiner als die des Moleküls, so kann wohl in einem gewissen Moment der Zusammenstoß auf das eben ruhende Molekül stattfinden, nach einer Aetherschwingung aber wird dasselbe etwas vor dem Ende seiner Schwingung, also in der Rückkehr gestoßen, und in vielen folgenden Perioden ebenfalls, seine Bewegung wird also vermindert oder gar aufgehoben. Stimmen dagegen die Perioden überein, so wird das Molekül immer z. B. in seiner Ruhelage getroffen, erhält bei jeder Schwingung einen Zuwachs seiner lebendigen Kraft und dadurch eine Verstärkung seiner Bewegung. Dieser specielle Fall des noch zu betrachtenden Kirchhoff'schen Gesetzes wurde von Lommel erweitert; derselbe machte nämlich darauf aufmerksam, daß ein Aetheratom auch jede Molekülschwingung treffe, wenn seine Periode halb so groß als die des Moleküls sei; allerdings geht dann die Hälfte der Aetherstöße verloren; denn trifft ein Aetheratom das Molekül jetzt in seiner diesseitigen Ruhelage, so ist dasselbe nach einer Aetherperiode in der jenseitigen, kann also nicht von dem Atom getroffen werden; dagegen erhält das Molekül wieder einen Stoß, wenn es in seine diesseitige Lage zurückgekehrt ist, weil dann auch wieder eine Aetherperiode zu Ende ist; es findet also hier auch eine Verstärkung statt. Ebenso in dem Falle, wenn die Aetherperiode doppelt so groß als die des Moleküls ist; dann wird das Molekül nur nach je zwei Schwingungen getroffen, aber doch regelmäßig nach je zwei Schwingungen, erfährt also ebenfalls eine Verstärkung. In den letzten Fällen, die Lommel indirecte Absorption nennt, in welchen also eine Schwingungszahl eines Körpers die halb oder doppelt so große Schwingungszahl von Lichtstrahlen, die höhere oder tiefere Octave, absorbirt, ist die Verstärkung nicht so groß wie bei der directen Absorption.

Welche Schwingungszahlen ein Körper enthält, welche Farben er daher absorbiren kann, hängt von seiner materiellen Beschaffenheit und von seiner Temperatur ab; schon öfter wurde erklärt, daß bei höherer Temperatur die Anzahl der verschiedenen Schwingungszahlen steige, weil bei vergrößerten Amplituden die Moleküle öfter zusammenstoßen. Aber auch bei niederer Temperatur enthält ein Körper nicht eine Schwingungszahl, sondern viele verschiedene, weil seine Moleküle mit verschiedener Kraft in ihrer Lage verharren, und diese Schwingungszahlen stehen jedenfalls in innigem Zusammenhange, weil die Moleküle durch ihre Anziehung ein zusammenhängendes Ganzes bilden. Wenn eine Schwingungszahl verstärkt wird, eine vergrößerte Amplitude erhält, so muß diese Verstärkung sich auch auf die übrigen übertragen, weil die Moleküle der ersten Zahl durch ihre vergrößerten Amplituden auf die übrigen stoßen. So wie also in einem musikalischen Instrumente die Grund- und Obertöne gleichzeitig erregt werden, so werden die Schwingungszahlen eines Körpers gleichzeitig verstärkt.

323 **Die Absorption des Lichtes** im engeren Sinne ist die Aufhebung einzelner Farbenstrahlen beim Eindringen von Licht in das Innere eines Körpers. Mittels des Spectroskops kann man leicht erfahren, welche Strahlen absorbirt wurden; man richtet dasselbe so, daß es das übrig gebliebene Licht aufnimmt; dieses wird dann in seine Farben zerlegt und bildet ein **Absorptionsspectrum**, in welchem an Stelle der absorbirten Farben dunkle Stellen erscheinen.

Die Emissionsspectralanalyse untersucht das Licht, das von leuchtenden Körpern ausgestrahlt wird, die Absorptionsspectralanalyse will dagegen erforschen, welche Veränderungen das Licht erfährt, wenn es durch Körper hindurchgegangen ist; sie muß daher voraussetzen, daß eine Lichtquelle vorhanden ist, welche allfarbiges Licht, also an sich ein continuirliches Spectrum liefert, wie etwa Lampenlicht oder für schwächere Apparate auch Tageslicht. Solches Licht läßt man durch den zu prüfenden Stoff gehen und untersucht es dann mit dem Spectralapparat. Setzt man z. B. vor den Spalt eines solchen Apparates ein dünnes blaues Kobaltglas und sieht sodann nach einer hellen Lichtflamme, so ist das Spectrum nicht mehr continuirlich; im Roth und Orange sind breite dunkle verwaschene Streifen, Gelb ist ungeschwächt, Grün durch ein dunkles Feld ersetzt, während der blaue Theil des Spectrums unverändert erscheint. Das Kobaltglas absorbirt demnach Roth, Orange und Grün, läßt jedoch Gelb, Blau und Violett durch. — Um die Absorptionsspectra flüssiger Körper zu beobachten, füllt man diese in dünne Gefäße, aus planparallelen Glastäfelchen gebildet, stellt das Gefäß vor den Spalt und sieht nach dem Himmel oder einer Flamme. Man hat auch eigene Absorptionsfläschchen von rechteckigem Querschnitte, 1^{cm} dick und 4^{cm} breit, so daß man die Wirkung dünner und dicker Schichten beobachten kann. Will man den Einfluß sehr dicker Schichten prüfen, so füllt man die Flüssigkeit in ein vertikal aufgestelltes Probirgläschen, das zur Abhaltung des Nebenlichtes von schwarzem Papier umschlossen ist und das durch einen unten liegenden Spiegel reflectirtes Himmels- oder Lam-

penlicht erhält, während man von oben durch ein ebenfalls vertikal aufgestelltes Spectroskop in das Gläschen sieht. Stellt man z. B. vor den Spalt ein Gläschen, das mit einer ätherischen Lösung von Blattgrün (Chlorophyll) erfüllt ist, so sieht man 5 verwaschene Banden im Roth, Orange und Gelb, während Grün ungeschwächt bleibt und der blaue Theil des Spectrums ganz verlöscht ist; das Chlorophyll absorbirt also alles Blau und Violett, einzelne Strahlenarten von Roth, Orange und Gelb, läßt jedoch Grün ungeschwächt durchgehen. — Die Absorptionsspectra der Gase und Dämpfe kann man am Besten mittels matter Lampenglaskugeln untersuchen, deren beide Oeffnungen durch Spiegelglastafeln verschlossen werden, während durch eine seitliche Oeffnung das Gas eingeleitet wird; man sieht mittels des Spectroskops durch die beiden Oeffnungen nach einem fernen Lichte; oder man schaltet einfach zwischen das Spectroskop und eine Flamme ein dampferfülltes Glasgefäß ein. Richtet man z. B. den Apparat auf eine mit dem violetten Joddampf erfüllte Flasche, so sieht man zahlreiche sehr schmale Banden eng neben einander im Orange, Gelb und Grün, während Roth, Blau und Violett fast unverändert bleiben. Auch Stickstoffdioxyd läßt Roth durch, enthält auch zahlreiche, aber mehr auseinander gestellte Banden in den folgenden Farben, während Blau und Violett fast ausgelöscht sind.

Wie die Emissionsspectra, so ändern sich auch die Absorptionsspectra unter verschiedenen Umständen, ohne jedoch ihre charakteristischen Eigenschaften einzubüßen. So ist die Absorption von Flüssigkeiten von der Concentration der Lösung und der Dicke der Schicht abhängig. Eine dünne Schicht sehr verdünnter Fuchsinlösung erzeugt einen schwarzen, verwaschenen Streifen im Gelbgrün; verstärkt man die Lösung, so wird der schwarze Streifen dunkler, verbreitert sich nach dem Blau hin und löscht schließlich Blau und Violett ganz aus, so daß nichts weiter hindurch geht als Orange und Roth. Füllt man Fuchsinlösung, die in dünner Schicht nur einen schmalen Absorptionsstreifen gibt, in ein Probirgläschen und sieht der Länge nach hindurch, so erscheint der Absorptionsstreifen breiter und dunkler. Der Einfluß der Schichtendicke wird auch bei Dämpfen beobachtet; auch die Erhöhung der Temperatur hat bei diesen einen ähnlichen Einfluß: jede einzelne Bande verbreitert sich nach dem Violett zu und es treten neue Banden nach dem Violett hin auf, vielleicht nur Verstärkungen vorher unsichtbarer Banden. Farblose Gase und Dämpfe, die in Gefäßen keine Spur von Absorption zeigen, entwickeln solche bei den Dimensionen der Natur im Großen. Beobachtet man ein weit entferntes Feuer durch ein Spectroskop, so sieht man in dem Spectrum desselben Absorptionsstreifen, sogenannte Luftlinien, die bei einem nahen Feuer wegfallen; ähnliche Linien beobachtete Janssen, als Licht durch eine 37^m lange, mit Wasserdampf gefüllte Röhre gegangen war. Bei Sonnenuntergang und bei feuchtem Wetter auch in den oberen Regionen der Luft enthält das Sonnenspectrum mehrere sonst nicht vorhandene Absorptionsstreifen.

Wenn hiernach die Absorptionsspectra auch durchgängig nicht so scharf sind, wie die Emissionsspectra, und wenn sie auch noch von Nebenumständen abhängen, so sind doch die meisten so charakteristisch, daß man jedem Körper auch ein bestimmtes Absorptionsspectrum zugestehen und ihn daher vermittelst desselben erkennen kann. Man theilt daher die Absorptionsspectra und danach die Absorption selbst in mehrere Abtheilungen. Fängt das Spectrum an irgend einer Stelle an, dunkel zu werden, und nimmt nach dem einen Ende, gewöhnlich nach dem violetten Ende, fortwährend an Dunkelheit zu, so sagt man, der Körper habe einseitige Absorption, wie z. B. Eisenchlorid. Steigt aber die Dunkelheit nach beiden Seiten hin, wie z. B. beim Kupferchlorid, so schreibt man dem Körper zweiseitige Absorption zu. Steigt die Dunkelheit allmälig bis zu einer gewissen Stelle des Spectrums und nimmt dann allmälig wieder ab, enthält also das Spectrum eine sehr breite, nach beiden Seiten verwaschene Bande, so nennt man dieselbe Schatten. Erscheint im Spectrum plötzlich eine dunkle Stelle, die ebenso rasch auf der anderen Seite abnimmt, so spricht man von Absorptionsstreifen. So hat Rothwein einen Schatten verbunden mit einseitiger Absorption, Fuchsin einen Streifen, Kobaltglas mehrere Streifen, Chlorophyll 5 Streifen und noch einseitige Absorption. Ganz abweichende Absorptionsspectra haben die glühenden Dämpfe und leuchtenden Gase; sie erzeugen scharfe Absorptionslinien.

Die Absorptionsanalyse ist in dem Leben und der Technik wichtiger als die Emissionsanalyse; denn ein Emissionsspectrum ergibt ein Körper nur, wenn er leuchtet, zu welchem Zwecke er gewöhnlich in Gluth versetzt werden muß; hierbei werden jedoch viele Körper zersetzt, so daß man nicht mehr das Emissionsspectrum der Verbindung, sondern das der Bestandtheile erhält. Die Absorptionsspectra kann man dagegen erhalten, ohne den Körper glühend zu machen; nur für Dämpfe sind geringe Hitzegrade nöthig, die meisten Körper aber können bei gewöhnlicher Temperatur untersucht werden. Es ist nur nöthig, sie in durchsichtigem oder durchscheinendem Zustande darzustellen, und zwar meist so, daß sie farbig sind. Wenn sich diese Bedingungen nicht bei Körpern in ihrem gewöhnlichen

Zustande erfüllen lassen, so kann es oft durch Lösung oder Verbindung geschehen. So geben Thonerde- und Magnesiasalze unter gewöhnlichen Umständen kein Absorptionsspectrum, lassen sich aber mit Hilfe des Purpurins dazu bringen. Versetzt man die gelbliche, sehr verdünnte, salmiakhaltige Purpurinlösung mit Alaun, so wird sie schön roth und gibt zwei kräftige Absorptionsstreifen, an denen man das Vorhandensein des Aluminiums erkennen kann. Von besonderer Bedeutung ist die Absorptionsspectralanalyse für die organischen Körper, da dieselben leicht im kalten Zustande ein Absorptionsspectrum ergeben, in der für das Emissionsspectrum nöthigen Gluth aber zerstört werden, so daß überhaupt für dieselben nur das Absorptionsspectrum zur Anwendung kommen kann; dasselbe genügt aber auch zur Erkennung derselben, also zur Analyse der Nahrungs- und Genußmittel, zur Aufdeckung ihrer Verfälschungen u. s. w. Das Absorptionsspectrum ermöglicht sogar nach den neuesten Fortschritten eine quantitative Analyse.

Die quantitative Spectralanalyse beruht darauf, daß ein Stoff um so mehr Licht absorbirt, je concentrirter die Lösung oder je dicker die durchstrahlte Schicht ist; die Schwächung, welche das durch einen Körper gehende Licht erfährt, ist also ein Mittel, die Concentration einer Lösung zu erkennen. Zu Grunde liegt hierbei die Thatsache, daß die Schwächung, ausgedrückt in Bruchtheilen der ursprünglichen Lichtintensität, immer dieselbe ist, gleichviel ob das aufgefallene Licht ursprünglich stark oder schwach ist. Wenn daher Licht von der Intensität 1 durch eine Schicht von 1^{cm} Dicke auf $1/n$ reducirt wird, so wird diese Intensität $1/n$ durch eine zweite gleiche Schicht abermals $n$mal kleiner, also $= 1 : n^2$, und ebenso durch x Schichten oder durch eine Schicht von x^{cm} Dicke $i = 1 : n^x$. Je dicker die Schicht ist, desto schwächer wird die Intensität des durchgegangenen Lichtes; der reciproke Werth der Schichtendicke gibt daher ein Urtheil über die lichtschwächende Kraft der Substanz. Bunsen nennt den reciproken Werth der Schichtendicke, welche das Licht durchbringen muß, um auf $1/10$ seiner ursprünglichen Intensität reducirt zu werden, den Extinctionscoëfficient. Bezeichnet man denselben mit α, so ist $1/\alpha$ die Schichtendicke, welche das Licht auf $1/10$ reducirt; setzen wir in der obigen Gleichung $1/10$ statt i und $1/\alpha$ statt der Schichtendicke x, so erhalten wir $1/10 = 1 : n^{1/\alpha}$ oder $10 = n^{1/\alpha}$, woraus $\alpha = \log n$. Nun ist aber nach obiger Gleichung $\log n = - 1/x \log i$; daher ist der Extinctionscoëfficient $\alpha = - 1/x \log i$, und wenn die Schichtendicke $x = 1^{cm}$ genommen wird, so ist $\alpha = - \log i$. Man erhält also den Extinctionscoëfficient, wenn man den negativen Logarithmus der Lichtstärke bestimmt, welche nach dem Gange durch eine 1^{cm} dicke Schicht übrig bleibt. Da nach der Gleichung $\alpha = - 1/x \log i$ der Extinctionscoëfficient der Schichtendicke umgekehrt proportional ist, und da diese bei gleicher Lichtschwächung offenbar mit der Concentration in umgekehrtem Verhältnisse steht, so ist der Extinctionscoëfficient der Concentration direct proportional. Bezeichnen wir die Coëfficienten zweier Lösungen mit α und α_1 und die Concentrationen derselben, d. h. ihre Gehalte an färbender Substanz mit c und c_1, so ist $\alpha : \alpha_1 = c : c_1$ oder auch $c : \alpha = c_1 : \alpha_1$; das Verhältniß der Concentration zum Extinctionscoëfficient ist eine constante Größe, welche Vierordt das Absorptionsverhältniß nennt. Diese Constante $c : \alpha = A$ kann man leicht ermitteln, indem man für eine Lösung, deren Gehalt an färbender Substanz man kennt, den Extinctionscoëfficient α nach obiger Methode bestimmt. Hat man diese Constante A, so findet man aus der Gleichung $c_1 : \alpha_1 = A$ den Gehalt c_1 einer anderen Lösung, indem man deren Extinctionscoëfficient α_1 bestimmt und diesen mit A multiplicirt. Es handelt sich also für die quantitative Analyse von Lösungen nur um eine rasche und leichte Methode, den Extinctionscoëfficient zu bestimmen.

Wie schon von den Dämpfen erwähnt wurde, steigt auch bei den meisten festen und flüssigen Körpern die Absorption mit der Temperatur; sie absorbiren nicht blos mehr Strahlen derselben Gattung oder Farbe, sondern auch oft noch Strahlen von anderen Farben, so daß ihre Absorptionsstreifen nicht blos dunkler, sondern auch breiter und zahlreicher werden. Bei manchen Körpern ist dies auch ohne Spectrum wahrzunehmen; so wird das weiße Zinkoxyd in der Hitze gelb, das gelbe Bleioxyd braun, das rothe Quecksilberoxyd braun, ja schwarz, weil diese Körper in der Hitze mehr Farben verschlucken und daher weniger zurückwerfen. Dieselbe Zunahme mit der Temperatur zeigt auch die Emission. Wie das Emissionsspectrum der glühenden Dämpfe und Gase bei höherer Temperatur mehr Linien enthält und bei den höchsten Temperaturen sogar continuirlich wird, so strahlen auch die festen und flüssigen Körper bei höherer Temperatur immer mehr Schwingungszahlen aus, bis sie bei der Weißgluth alle nur denkbaren Strahlen von 100 bis 1000 Billionen Schwingungen emittiren. Hierdurch wird ein Zusammenhang zwischen der Absorption und Emission angedeutet, der hinsichtlich der Wärmestrahlen schon längst bekannt war, von Kirchhoff aber als Gesetz ausgesprochen und bewiesen wurde.

324 **Kirchhoffs Absorptionsgesetz und die Fraunhofer'schen Linien.** Das Emissionsvermögen ist die Intensität der von einem Körper ausgesandten Strahlen

einer Gattung oder Farbe. Das Absorptionsvermögen ist das Verhältniß der Intensität der absorbirten Strahlen zur Intensität der den Körper treffenden Strahlen derselben Gattung. Ueber diese beiden Vermögen besteht nach Kirchhoff folgendes Gesetz: Das Verhältniß zwischen dem Emissionsvermögen und dem Absorptionsvermögen ist für Strahlen von derselben Wellenlänge und derselben Temperatur bei allen Körpern dasselbe.

Kirchhoffs strenger Beweis ist an dieser Stelle unmöglich; wir müssen uns mit einer Erklärung begnügen. Die Emission besteht darin, daß ein Körper die in ihm enthaltenen Schwingungen dem benachbarten Aether mittheilt; die Absorption darin, daß der Körper Schwingungen von dem benachbarten Aether empfängt. Nun sind aber die meisten Körper auf bestimmte Schwingungszahlen abgestimmt, d. h. ihre Moleküle vermögen bei einer gewissen Temperatur nur eine gewisse kleinere oder größere Anzahl von Schwingungszahlen zu vollbringen. Andere als die in ihm enthaltenen Schwingungszahlen aber kann ein Körper dem benachbarten Aether nicht mittheilen, er kann nur seine Schwingungszahlen emittiren. Dasselbe gilt nun auch von der Absorption; wie ein mittönender Körper aus einem Tongemische nur diejenigen Schallschwingungen aufnimmt, auf welche er abgestimmt ist, so kann auch jeder Körper aus den Aetherwellen seiner Umgebung nur diejenigen Schwingungen aufnehmen, auf welche seine Moleküle bei der stattfindenden Temperatur abgestimmt sind.

Das Kirchhoff'sche Gesetz erklärt das Absorptionslinienspectrum der glühenden Dampfe und Gase und die Fraunhofer'schen Linien. Ein Absorptionslinienspectrum entsteht, wenn das allfarbige Licht eines in hoher Weißgluth befindlichen Körpers durch glühende Dämpfe oder Gase geht; und zwar stehen die dunkeln Absorptionslinien an denselben Stellen des Spectrums, an welchen das Spectrum des für sich allein leuchtenden Dampfes oder Gases hellfarbige Linien enthält. Die Fraunhofer'schen Linien des Sonnenspectrums entstehen daher dadurch, daß das allfarbige Sonnenlicht durch eine die Sonne umgebende leuchtende Dampf- oder Gashülle geht. Aus den Fraunhofer'schen Linien kann man die Bestandtheile dieser Gashülle erkennen; es sind diejenigen Dämpfe oder Gase, welche für sich allein leuchtend, an den Stellen der Fraunhofer'schen dunkeln Linien hellfarbige Linien erzeugen.

Natriumdampf strahlt für sich allein leuchtend, wie bekannt, die eine Schwingungszahl von 500 Bill. aus; daraus folgt, daß seine Moleküle nur auf diese eine Schwingungszahl abgestimmt sind, daß sie nur diese eine Art von Schwingungen ausführen können. Wenn daher allfarbiges Licht von größerer Intensität durch Natriumdampf geht, so kann derselbe aus dieser Lichtmischung nur diese eine Art von Schwingungen aufnehmen, und er muß dieselbe aufnehmen, weil seine Moleküle von den heftiger bewegten Aetheratomen getroffen werden. Wenn daher das allfarbige Licht aus dem Natriumdampfe heraustritt, so muß diese eine und zwar nur diese eine Schwingungszahl an Intensität geschwächt sein, es muß daher in dem sonst continuirlichen Spectum des allfarbigen Lichtes die Stelle dunkler sein, an welcher sich das Gelb jener Schwingungszahl befindet, d. h. es muß an der Stelle des Spectrums eine dunkle Linie stehen, an welcher im Spectrum des glühenden Natriumdampfes die gelbe Linie steht. Man nennt dieses Auftreten dunkler Linien an der Stelle der hellen Linien glühender Dämpfe die Umkehrung des Spectrums. Ausführen läßt sich die Umkehrung auf verschiedene Art. Am einfachsten, indem man in der hinteren Seite der heißen Bunsen'schen Gasflamme einen Platindraht zur Weißgluth bringt, in die vordere Seite weiter unten eine Natriumsalzperle hält und mit einem Taschenspectroskop nach dem Platindrahte sieht; man erblickt dann in dem continuirlichen Spectrum des Platindrahtes eine dunkle Linie an der Stelle des gelben Natriumstreifens, an der Stelle der Fraunhofer'schen Linie D. — Macht man in den unteren Kohlenstift der elektrischen Lampe eine Grube und legt in dieselbe ein Stückchen Natrium, so ist bei dem Durchgehen des elektrischen Stromes das elektrische Kohlenlicht bald von einer Natriumdampfwolke umhüllt, und man erblickt auch hier in dem Spectrum des elektrischen Lichtes die dunkle Linie D. — Man kann auch vor das elekrische Licht eine Röhre stellen, die mit heißem Natriumdampf gefüllt ist, und mit dem Spectroskop durch die Röhre nach dem Lichte sehen, um diese dunkle Linie zu erblicken. — Auch sogar objectiv auf einem Schirme kann man das Spectrum mit der dunkeln D-Linie herstellen: Vor dem elektrischen Lichte brennt eine Bunsen'sche Gasflamme mit einer Natriumsalzperle, vor dieser steht eine Linse,

dann folgt das Prisma und endlich der Schirm, auf dem sich das Spectrum mit der dunkeln D-Linie entwickelt.

Wenn sonach die dunkeln Absorptionslinien durch glühende Dämpfe oder Gase entstehen, durch welche das Licht einer intensiveren allfarbigen Lichtquelle geht, und wenn das Spectrum der Sonne mit seinen Fraunhofer'schen Linien ein derartiges Absorptionsspectrum ist, so muß man schließen, daß die Sonne und die Fixsterne weißglühende von einer Dampfhülle umgebene Körper sind, wodurch sich die Fraunhofer'schen Linien erklären. Und wenn weiter die dunkeln Linien an denselben Stellen des Spectrums stehen, an welchen die absorbirenden oder linienerzeugenden Dämpfe helle Linien erzeugen, wenn sie für sich allein glühen, so kann man offenbar aus der Lage der dunkeln Linien eines Absorptionsspectrums die Dämpfe erkennen, welche als Dampfhülle diese Linien erzeugen. Findet man z. B. in einem Absorptionsspectrum an der bekannten Stelle der Natriumlinie einen dunkeln Streifen, wie die dunkle Linie D im Sonnenspectrum, so ist dies ein Zeichen, daß das Licht durch eine Natriumdampfschicht gegangen ist. In solcher Weise hat man aus den Fraunhofer'schen Linien des Sonnenspectrums und ihrer Stellung in den verschiedenen Farben geschlossen, daß die Sonne eine Hülle hat, die hauptsächlich aus Wasserstoff und Eisendampf besteht, daß aber auch Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium u. a. Stoffe in derselben enthalten sind. Aehnliches gilt für die Fixsterne; s. 564. u. 559.

325 **Anwendung der Spectral-Analyse.** 1. Zum raschen Erkennen des Vorhandenseins von Elementen, besonders von Metallen in größeren und geringsten Mengen. Diese Anwendung beruht auf der unerhörten Empfindlichkeit der Emissionsspectralanalyse; $^1/_{3\,000\,000}$ mg eines Natriumsalzes genügt, um die gelbe Linie zu erzeugen. Bei anderen Elementen ist die Empfindlichkeit allerdings geringer, aber immer noch sehr groß; so sind $^9/_{1\,000\,000}$ mg eines Lithiumsalzes, $^1/_{1000}$ mg eines Kaliumsalzes, $^6/_{100\,000}$ mg eines Strontiumsalzes ausreichend, die Linien der Metalle zu erzeugen. Das Natriumspectrum ist in jedem anderen Spectrum vorhanden, woraus man schließen muß, daß die Luft immer und überall Natrium, wohl als Kochsalz enthält, vielleicht in Gestalt von Sonnenstäubchen, durch das Zerstäuben des Meerwassers hervorgebracht; kein anderes chemisches Mittel gibt von diesem Kochsalzgehalt Kunde. Bringt man das Aschenende einer Cigarre in die Bunsen'sche Flamme, so sieht man mit dem Spectroskop gewöhnlich die Linien von Na, K und Li. In vielen Fällen kann man auf dieselbe Weise, in anderen nach einfacher Vorbereitung erkennen, ob in irgend einem Mineral, einer Bodenart, einer Lösung irgend ein Metall enthalten ist; ja auch P läßt sich auf ähnliche Art nachweisen. So wurde gefunden, daß manche Elemente wie z. B. Li viel weiter verbreitet sind, als man vorher wußte; Bence Jones beobachtete bei einem Staarblinden, daß mit der Nahrung eingenommenes Li schon in 3½ Stunden bis in die Krystalllinse gedrungen war.

2. Zum Entdecken neuer Elemente, die in der Natur nur spurweise vorkommen. So sah Bunsen in dem Spectrum des Lepidoliths zwei intensiv rothe Linien, die keinem bekannten Metall angehören, also einem bis dahin unbekannten, dem Rubidium; so fand er in der Dürkheimer Soole durch 2 blaue Spectrallinien das Caesium. Crookes fand in dem Schlamme mancher Bleikammern (Harz) durch eine grüne Spectrallinie das Thallium (das Schnabelthier unter den Metallen), Reich und Richter in der Freiberger Zinkblende mittels einer tiefblauen Linie das Indium, Lecoq de Boisbaudran in der Blende der Pyrenäen mittels einer violetten Linie das Gallium, und in der letzten Zeit sollen zwei neue Elemente, Davyum und Lavoisium in ähnlicher Weise entdeckt worden sein.

3. Zur Erkennung der Stoffe, der Constitution, der Atmosphäre und der Vorgänge der Himmelskörper. Die Chromosphäre der Sonne, die unterste, rosenfarbige Schicht ihrer Dunsthülle, und die Protuberanzen, die rothglühenden Gassäulen, die sich aus der Chromosphäre erheben, zeigen im Spectrum die farbigen Wasserstofflinien, bestehen also aus glühendem Wasserstoffgas; dieselben beobachtet man auch in dem Spectrum neu erschienener und wieder verschwundener Sterne. In dem Sternbilde der Krone erschien 1866 und in dem Schwan 1876 ein neuer Stern; so lange sie hell waren, sah man in dem Spectrum dieser Sterne neben dunkeln Fraunhofer'schen auch helle, farbige Spectrallinien, in dem ersten die von H, in dem letzten die von H, Na und Mg; das Aufleuchten ist also glühenden Gaseruptionen zuzuschreiben. — Auch manche Nebelflecken erweisen sich durch ein Linienspectrum als Gase und die Kometenhüllen- und Schweife durch ihr Dreibandenspectrum als Kohlenwasserstoffdämpfe. — Die Absorptionslinienspectra der Sonne und der Fixsterne zeigen (324., 564. und 559.), daß diese Weltkörper weißglühende Kugeln von einer Dampfhülle umgeben sind, und die Stellung, Breite und Dunkelheit dieser Linien gibt Aufschluß über den Stoff und die Menge dieser Dämpfe.

4. Zum Messen von Geschwindigkeiten am Himmel, die durch andere Mittel nicht erforschlich sind, z. B. der Sterne, die eine gegen die Erde hin oder von der

Erde weg gerichtete Bewegung haben, der Gasströme auf der Sonne von gleicher Bewegungsrichtung. Diese Messung beruht auf Dopplers Princip (277.). Wie ein Ton durch Annäherung der Tonquelle höher erscheint, so muß auch die Farbe einer Lichtquelle sich erhöhen oder erniedrigen, wenn dieselbe sich mit einer solchen Geschwindigkeit nähert oder entfernt, die nicht verschwindend klein gegen die des Lichtes ist. Wenn z. B. eine Wasserstofferuption auf der Sonne nach uns zugewendet ist, mag sie nun auf der Mitte der Sonnenscheibe radial ausbrechen oder am Rande derselben eine für die Sonnenoberfläche wagrechte Richtung als Gassturm haben, so wird die Wellenzahl, die in einer Secunde bei uns anlangt, erhöht, die grünblaue F-Linie des Wasserstoffs wird nach dem Violett hin verschoben; wenn sich aber der Wasserstoff von uns entfernt, so wird sie nach dem Roth hin verschoben. Lockyer hat (1868) solche Beobachtungen gemacht und hierdurch nicht blos bewiesen, daß die Protuberanzen Wasserstoffgasausbrüche sind, welche sowohl Tausende von Meilen senkrecht in die Höhe schießen, als auch sturmartig wagrecht sich fortbewegen, sondern hat auch sogar eine Geschw. von 32 M. für diese Ausbrüche durch Rechnung gefunden, wobei die Größe der Verschiebung der Spectrallinien die Rechnungsgrundlage bildete. In ähnlicher Weise hat Huggins (1868) aus der Verschiebung der Fraunhofer'schen Linien in dem Spectrum des Sirius berechnet, daß dieser Fixstern eine von der Erde weg gerichtete Eigenbewegung von 6 M. Geschw. habe.

5. Das Absorptionsspectrum dient zur Erkennung aller Stoffe, Elemente oder Verbindungen, organischen oder unorganischen Ursprungs, wenn dieselben sich farbig durchsichtig darstellen lassen, entweder selbst oder in Lösung, Mischung, Verbindung u. s. w. mit anderen Stoffen; die Absorptionsspectralanalyse gewinnt deßhalb ein weites Gebiet zur Aufdeckung der Verfälschung von Farbstoffen, Nahrungs- und Genußmitteln, zur Feststellung von Vergiftungen und anderer Verbrechen, zur Erkennung von Krankheiten, zu physiologischen Forschungen u. s. w. Einige Beispiele mögen eine Idee dieser Anwendungen geben. Wird eine Probe von Ultramarin mit Lackfirniß aufgeschlemmt, so zeigt eine Sorte im Absorptionsspectrum ein brillant rothes Band von A bis B, eine andere Sorte hat dieses Band nur schwach, eine dritte gar nicht. Der Fabrikant kann daher aus dem Absorptionsspectrum mit einem Blicke erkennen, ob die Stoffe der Mischung beim Ultramarin-Brennen richtig reagirt haben. — Das künstliche Alizarin hat keine Absorptionsstreifen, das natürliche aber die deutlich erkennbaren Streifen des Purpurins. — Ist rother Wein z. B. mit dem Beerensaft von Flieder, Rainweide oder Malve gefärbt, so entstehen nach vorsichtigem Neutralisiren mit Alaun und schwachem Ansäuern mit Essigsäure im Absorptionsspectrum verwaschene Streifen in der Gegend der Fraunhofer'schen Linie D, was beim echten Rothwein nicht geschieht. — Nach Sorby kann mittels des Spectrums sogar das Alter des Weins gefunden werden. — Auch der Farbstoff von Malz und Hopfen kann von dem falschen der Colombowurzel, der Pikrinsäure und der Gelbwurz im Biere mittels des Absorptionsspectrums unterschieden werden. — Die Reinheit von Käse, Butter, Safran, Rhabarber u. s. w. läßt sich durch Absorptionsstreifen erkennen. — Ist irgend ein Stoff mit Blut gemischt, so erzeugt eine alkalische Lösung desselben auf Zusatz von Ammoniumhydrosulfid zwei außerordentlich kräftige Absorptionsstreifen zwischen D und E und zwischen E und b, welche Reaction zur Erkennung des Blutes in gerichtlichen Fällen die wichtigste ist. Blut, das mit Kohlenoxyd geschwängert ist, bleibt bei Zusatz von Schwefelammonium unverändert, wodurch es leicht möglich wird, Vergiftungen des Blutes mit Kohlenoxyd nachzuweisen. — Ebenso kann das Vorhandensein von Galle im Blut durch die eigenthümlichen Absorptionsstreifen der Galle nachgewiesen und dadurch die Gelbsucht erkannt werden, sowie durch das Vorhandensein von Eiweiß im Harn die Bright'sche Nierenkrankheit u. s. w.

6. Zum Studiren des Verlaufes chemischer und technischer Processe. Beim Titriren mit Kaliumpermanganat (Chamäleon) auf Eisenoxydul neben viel Eisenoxyd ist die Rosenfärbung kein sicheres Zeichen des Endpunktes der Reaction, wohl aber das Auftreten der Absorptionsstreifen der Hypermangansäure. — Ebenso dienen die Spectrallinien zum Erkennen des Endpunktes der Bessemerstahlbereitung. Bessemers Verfahren zur Stahlbereitung besteht nämlich darin, daß durch das geschmolzene Gußeisen atmosphärische Luft in feinen Strömen so lange durchgepreßt wird, bis von den 5% Kohlenstoff des Gußeisens durch Verbrennung nur noch 2% vorhanden sind. Man erkennt dies an dem Auftreten und raschen Verschwinden von 4 blauen und 1 violetten Linie im Spectrum der über dem kochenden Eisen schwebenden, sogenannten Bessemer-Flamme.

7. Zur quantitativen Analyse von Stoffen, die ein Absorptionsspectrum zu bilden im Stande sind. Nach 323. ist die Concentration einer Lösung, der Gehalt einer Flüssigkeit an färbender oder absorbirender Substanz dadurch zu bestimmen, daß man das Absorptionsverhältniß A dieser Substanz, das eine constante Größe ist, mit dem Extinctionscoëfficienten α multiplicirt. Um den Extinctionscoëfficient aufzufinden, muß unter-

sucht werden, wie viel Licht eine 1cm dicke Schicht der Lösung absorbirt. Zu diesem Zwecke theilte Vierordt den Spalt eines Spectroskops in zwei über einander befindliche Hälften, setzt vor die untere Spalthälfte den zu untersuchenden Körper, und verengert dann durch Drehung an seinen Schrauben, die mit einer großen getheilten Trommel versehen sind, die obere Spalthälfte so lange, bis ihr Licht nur noch ebenso stark ist, wie das nach der Absorption übrig gebliebene Licht der unteren Hälfte. Ist z. B. die obere Spalthälfte auf 30° eingestellt, so ist die Lichtstärke nur noch 0,30 der ursprünglichen; hieraus ist der Extinctionscoëfficient zu berechnen. Diese Methode der quantitativen Analyse ist schon bedeutend verbessert worden und wird gewiß noch auf den höchsten Grad der Einfachheit, Raschheit und Genauigkeit gebracht. Praktisch angewendet wird dieselbe schon zur Bestimmung der entfärbenden Kraft der Knochenkohle.

326 **Die Körperfarben** entstehen dadurch, daß ein Körper einzelne Farbenbestandtheile des auftreffenden und in ihn eindringenden Lichtes absorbirt und die übrig bleibenden zurückwirft oder theils zurückwirft, theils durchläßt; im ersten Falle ist er farbig undurchsichtig, im letzten farbig durchsichtig. Die Absorption geschieht schon in der obersten Schicht des Körpers, die Reflexion von den unter dieser Schicht liegenden Molekülen; sie ist daher selbst an den glättesten Körpern eine diffuse. Wenn das Licht theilweise durchgeht, so wird in den tieferen Schichten noch mehr Licht absorbirt als in den obersten, aber doch nur Licht von derselben Farbe; daher erscheint ein farbig durchsichtiger Körper im durchgelassenen Lichte in denselben Farben wie im reflectirten Lichte; durch ein blau aussehendes Glas erscheint auch die Welt blau.

Läßt man auf farbiges Papier, das bekanntlich seine Farbe nur einer dünnen Schicht verdankt, im Dunkeln ein Sonnenspectrum fallen, so erscheint nur der Theil des Spectrums hell, der mit der Farbe des Papiers übereinstimmt oder derselben ähnlich ist; die übrigen Theile aber erscheinen dunkel oder nur schwach erhellt; hieraus ersieht man, daß die dünne Oberflächenschicht schon die Absorption vollzieht, daß sie einen Theil der Farben absorbirt, den anderen nicht. Dieser nicht absorbirte Theil wird vereinigt zurückgeworfen und bildet die Körperfarbe beim Daraufsehen; geht derselbe theilweise weiter, so bildet dieser Theil die Körperfarbe beim Durchsehen. Die diffus reflectirten Farben kommen von tiefer liegenden Molekülen; sie vereinigen sich noch mit dem Lichte, das an der äußersten Oberfläche reflectirt wird. Nur die Metalle und die Körper mit Oberflächenfarben haben ihre farbige Reflexion schon an der äußersten Oberfläche (Jamin 1848).

Ein durchsichtiger Körper ist farblos durchsichtig, wenn er alle Bestandtheile des auffallenden Lichtes in demselben Verhältnisse durchläßt, wie sie in dem Lichte selber gemischt sind. Er ist blau durchsichtig, wenn er einen Theil der Strahlen absorbirt und nur solche Strahlen durchläßt, die in unserem Auge den Eindruck des Blau hervorbringen. So werden z. B. von Lösungen der Kupferoxydsalze die rothen und gelben Strahlen vorzugsweise absorbirt, die blauen vorzugsweise, die grünen und violetten schwächer durchgelassen; daher erscheinen solche Flüssigkeiten blau. Die gelben Farbstoffe lassen gelb ungeschwächt, roth und grün schwächer durch, absorbiren aber blau und violett. Die Mischung einer blauen und einer gelben Flüssigkeit absorbirt daher die rothen, gelben, blauen und violetten Strahlen, läßt nur die grünen einigermaßen durch und erscheint daher im durchgelassenen Lichte grün. In ähnlicher Weise wird die Absorption vermehrt und dadurch das durchgelassene Licht geschwächt, wenn dasselbe durch mehrere verschiedenfarbig durchlassende Medien gehen muß. Eine Verbindung eines grünen mit einem rothen Glase erscheint fast undurchsichtig, weil das erste fast alle Strahlen mit Ausnahme der grünen und das letzte fast alle mit Ausnahme der rothen verschluckt, so daß die aus dem grünen Glase tretenden Strahlen in dem rothen vernichtet werden; ähnlich ist es bei der Verbindung eines blauen und orangen oder eines gelben und violetten Glases. Ganz undurchsichtig werden solche Verbindungen nicht, weil die Absorption nicht vollständig ist, weil also nie aus einem Glase eine wahrhaft homogene Farbe kommt. Wird ein farblos durchsichtiger Körper zu Pulver zerstoßen, so werden, da er nicht absorbirt, von den Flächen der Theilchen alle Strahlenbestandtheile des auffallenden weißen Lichtes nach allen Richtungen reflectirt und zwar meist total reflectirt; daher erscheint das Pulver weiß. Wird ein farbig durchsichtiger Körper zu Pulver zerstoßen, so wird er wegen der totalen Reflexion ebenfalls undurchsichtig und hat dieselbe Farbe wie im ganzen Zustande, nur mehr weißlich wegen der Zumischung des total reflectirten weißen Lichtes. Ein Farbenpulver ist um so dunkler und gesättigter, je gröber es ist; um so dunkler, weil die Menge des total reflectirten weißen Lichtes mit der Zahl der Theilchen wächst, und um so gesättigter, d. i. um so reiner und reicher in seiner Farbe, weil die Menge der verunreinigenden, absorbirten Farbe mit der Dicke der Theilchen zunimmt.

Ein undurchsichtiger Körper ist weiß, wenn er alle Bestandtheile des auf ihn fallenden Sonnenlichtes in hohem Betrage und in gleichem Maße zurückwirft, wie sie in dem Sonnenlichte enthalten sind, wenn er also nur kleine Beträge absorbirt; einen absolut weißen Körper d. i. einen solchen, der gar kein Licht absorbirt, gibt es nicht. Ein Körper ist schwarz, wenn er alle Bestandtheile des auf ihn fallenden weißen Lichtes absorbirt und demnach kein Licht zurück wirft; das Auge und die optischen Instrumente haben schwarze Innenwände, damit keine Störung durch reflectirtes Licht entstehe. Absolut schwarze Körper gibt es indessen nicht; glatte, spiegelnde Stellen schwarzer Körper reflectiren das weiße Licht, sind daher weiß oder höchstens grau. Grau ist ein lichtschwaches Weiß; ein Körper ist grau, wenn er zwar alle Bestandtheile des weißen Lichtes in dem richtigen Maße, aber in geringem Betrage zurückwirft. Ein Körper erscheint farbig, wenn er einen Theil der auf ihn fallenden Farbenbestandtheile weißen Lichtes absorbirt und den übrigen Theil zurückwirft. Eine und dieselbe Farbe könnte dann aber auf zweierlei Weise entstehen: z. B. ein Körper könnte dadurch gelb sein, daß er alle Farben mit Ausnahme des Gelb absorbirte und nur das Gelb zurückwürfe, oder auch dadurch, daß er nur das Violett absorbirte und alle übrigen Farben zurückwürfe, die zusammen dann den Eindruck von Gelb hervorbrächten. Diese beiden idealen Fälle kommen in der Natur kaum vor; die natürlichen und künstlichen Farben sind nicht homogen, sie bestehen aber auch nicht aus einer gleichmäßigen Mischung aller Spectralfarben mit Ausnahme einer einzigen; sie enthalten vielmehr meist eine Spectralfarbe in größerer Menge gemischt mit einer geringeren Menge der ähnlichen und einer noch geringeren Menge unähnlicher Farben, was sich durch Spectralanalyse eines jeden beliebigen schmalen Farbenstreifens ergibt. — Daß trübe Medien, wie Milchglas, eine sehr dünne Goldschicht, die Iris und dergl. im durchgelassenen Lichte eine andere Farbe zeigen als im auffallenden Lichte, im durchgelassenen Lichte meist gelblich, im auffallenden bläulich erscheinen (Goethes Urphänomen), erklärt sich nach Brücke (1852) durch die Interferenz des Lichtes, welche durch die sehr kleinen Theilchen des trüben Mediums veranlaßt werde.

Aus dem Vorausgehenden ist schon ersichtlich, daß die Körperfarbe vor Allem von dem auffallenden Lichte abhängt; ohne Licht gibt es keine Farbe und mit der Farbe des auffallenden Lichtes ändert sich auch die Körperfarbe, woraus zugleich folgt, daß die Farben keine reale Existenz haben, sondern nur Erzeugnisse des auffallenden Lichtes sind. Fällt auf einen Körper nur homogenes Licht, so erscheint er hell in der Farbe dieses Lichtes, wenn er dasselbe nicht absorbirt, dagegen schwarz, wenn er dieses Licht verschluckt; im Lichte von Spiritus, der Kochsalz gelöst enthält, erscheint alles Weiße und Gelbe hell, die meisten übrigen Farben aber sind schwarz. Im Kerzen- und Lampenlichte, das wegen Mangels blauer Strahlen gelb erscheint, sind Gelb und Weiß gleich und Blau sieht aus wie Grün. Läßt man Sonnenlicht in ein dunkles Zimmer fallen und durch ein mit Kupferoxydul roth gefärbtes Glas oder durch ein blaues Kobaltglas gehen, so erscheinen durch das erste nur rothe, durch das letzte nur blaue und rothe Körper farbig hell, die übrigen aber schwarz, ebenso wie durch das rothe Glas gesehen nur das Weiße und Rothe hell, die verwandten Farben weniger hell, die nicht verwandten, wie Grün und Blau, schwarz auftreten, während durch das blaue Glas alles Gelbe und Grüne schwarz aussieht.

Eine lehrreiche Anwendung der Absorption sind das Erythrophytoskop von Simler und Wild (1862), das Erythroskop und das Melanoskop von Lommel (1871). Betrachtet man ein grünes Gebüsch durch ein Spectroskop, so sieht man sehr intensiv das Roth vor B, zwischen B und C ein dunkles Band, dann wieder deutlich das übrige Roth, das Orange und Gelb, schwächer schon Grün und Blau, dagegen ist die Stelle von Indigo und Violett ganz dunkel; dieselbe Erscheinung beobachtet man, wenn man das Licht durch ein Blatt oder eine Lösung von Blattgrün (Chlorophyll) gehen läßt und dann mit dem Spectroskop untersucht. Hieraus folgt, daß die Pflanzen das Roth zwischen B und C stark absorbiren (Lommel glaubt, daß diese Strahlen den Assimilationsproceß besorgen), ebenso stark Violett und Blau, daß also die grüne Farbe der Pflanzen ein Gemisch von Dunkelroth, Hellroth, Orange, Gelb, etwas Grün und Hellblau ist, da die Pflanzen diese Farben nicht absorbiren, sondern reflectiren und durchlassen. Das Erythrophytoskop (ἐρυθρός, roth; φυτόν, Pflanze) besteht aus einer Brille, deren Gläser aus je einer blauen Kobaltglasplatte und einer gelben Eisenoxydglasplatte zusammengesetzt sind; das erste Glas läßt eben das Dunkelroth, welches die grünen Blätter reflectiren, ungeschwächt durch, ebenso das zweite Glas, da dieses das ganze Roth durchläßt, das Hellroth der Blätter jedoch wird von dem ersten Glase absorbirt, ebenso das Orange und Gelb, während das zweite Glas das Blau der Blätter absorbirt; es gelangt daher von der Farbenmischung der Blätter nur das Dunkelroth und Grün ins Auge, gemischt mit einigen gelbgrünen Strahlen, da das Kobaltglas eine bestimmt gelbgrüne Strahlengattung durchläßt, welche Mischung den Blättern eine korallenrothe Färbung ertheilt; durch das Erythrophytoskop erscheint also die Pflanzenwelt korallenroth; der Himmel erscheint durch dasselbe cyanblau, Erde und Wolken violett.

Eine Combination des blauen Kobaltglases mit einem dunkelrothen Glase läßt nur die dunkelrothen Pflanzenstrahlen durch; daher erscheint durch dieselbe, das Erythroskop, die Pflanzenwelt roth, die übrige Natur dunkel. Eine Combination eines dunkelrothen Rubinglases mit einem violetten Glase, Melanoskop genannt, läßt die Pflanzenwelt dagegen schwarz erscheinen.

Um die hier auftretenden Farbenerscheinungen im voraus angeben zu können, muß man die Theorie der Mischfarben kennen.

327 **Die Mischfarben** (Helmholtz, physiologische Optik 1867). Unter Mischfarbe versteht man den Farbeneindruck, der durch das Zusammentreffen mehrerer einfachen Farben auf einer Stelle der Netzhaut des Auges hervorgebracht wird. Dieser neue Eindruck ist ein einheitlicher und läßt die Bestandtheile nicht erkennen. Methoden der Farbenmischung sind: 1. Man bringt verschiedene Spectra oder verschiedene Theile desselben zum Decken. Einen Apparat zur bequemen Ausführung dieser Methode gab Smith (1873) (s. unten). 2. Man blickt durch eine ebene Glastafel in schräger Richtung nach einer farbigen Fläche, während die dem Beobachter zugewendete Seite der Glastafel ihm gleichzeitig Licht eines andersfarbigen Objectes durch Reflexion zusendet (Lamberts Versuch 1772). 3. Man läßt Scheiben schnell rotiren, auf denen verschiedenfarbige Sectoren angebracht sind; ist die Rotation schnell genug, so haftet der Eindruck der ersten Farbe noch im Auge, wenn der einer folgenden dazu kommt (Farbenkreisel). Nicht richtig ist die Methode der Mischung von Farbstoffen; denn hierdurch entsteht keine Addition, sondern eine Subtraction von Farben, indem der eine Farbstoff einen Theil der Spectralfarben absorbirt, die bei der Absorption durch den anderen übrig bleiben. Spectrales Gelb und Indigo geben gemischt Weiß, nicht aber Grün, wie es durch Mischung eines gelben und eines blauen Farbstoffes entsteht, weil nämlich der erste die blauen und violetten und der letzte die rothen und gelben Strahlen absorbirt, so daß nur die grünen übrig bleiben. Durch Anwendung der richtigen Methoden entsteht nun zunächst aus den Spectralfarben eine neue Reihe von Farben, nämlich Purpur, Weiß und Uebergangsstufen von Weiß in Purpur und in die Spectralfarben.

Purpur ist die Mischung der zwei äußersten Spectralfarben, Roth und Violett; mischt man statt des letzten die vorletzten, Blau und Orange, so entsteht Rosaroth, ein weißliches Purpur. Das Purpur bildet für das Auge einen Uebergang zwischen den offenbar verwandten Farben Roth und Violett, so daß bei Einschaltung des Purpur die Spectralfarben in einen Kreis geordnet werden könnten. — Weiß entsteht nicht blos durch Mischung aller Spectralfarben, sondern es ist auch der Eindruck einer jeden einzelnen Farbe in ihrer höchsten Intensität, es entsteht aber auch durch Mischung von zwei und von drei Spectralfarben. Nimmt man nämlich aus dem Spectrum das Roth heraus und mischt die übrigen Farben, so entsteht ein Grünlichblau, dessen Mischung mit jenem Roth natürlich wieder Weiß hervorruft. Mischt man nun mit dem Roth nicht dieses heterogene Grünlichblau, sondern die Spectralfarbe Grünlichblau, so entsteht ebenfalls Weiß. Zwei Farben, die zusammen Weiß geben, nennt man Complementärfarben. Solche sind außer Roth und Grünlichblau auch Orange und Cyanblau, Gelb und Indigo, Grünlichgelb und Violett. Das Grün des Spectrums hat keine homogene Complementärfarbe, sondern eine zusammengesetzte, nämlich Purpur; also entsteht Weiß auch durch Vereinigung von Grün, Roth und Violett. Die Wellenlängen der Complementärfarben stehen ebenso wenig in einem einfachen Verhältnisse zusammen wie die Intensitäten derselben; während die Intensitäten von complementärem Cyanblau ungefähr derjenigen des Orange gleich ist, bedürfen Gelb und Grün einer größeren Intensität als Violett und Indigo, um diesen complementär sein zu können.

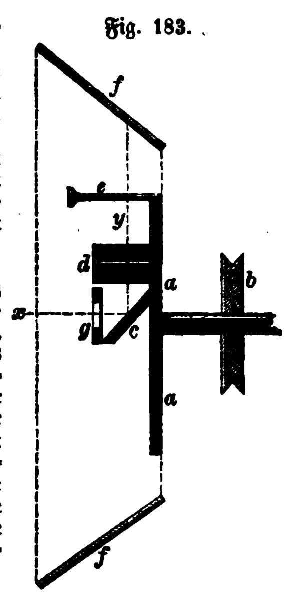


Fig. 183.

Der Apparat von Smith zur Mischung der Spectralfarben ist in Fig. 183 im Durchschnitt abgebildet. Mittels der Rolle b wird die Achse derselben, sowie die Scheibe aa, der schiefe Spiegel c und das Prisma d in rasche Rotation gesetzt; die durch den Schlitz g auf den Spiegel c fallenden Strahlen x werden durch diesen in die Richtung y auf das Prisma reflectirt, nach der Zerlegung auf der kegelförmigen Scheibe ff aufgefangen und bei hinlänglich rascher Rotation zu einem einheitlichen Eindruck vereinigt. Bei e sind Schieber angebracht, um beliebige Spectralfarben abblenden und so die Mischung der übrigen studiren zu können.

Durch die Mischung zweier nicht complementären Spectralfarben entstehen Zwischenstufen, die durch Weiß geschwächt und daher, wie man sagt, weniger gesättigt sind als die reinen Spectralfarben. Mischt man zwei Farben, die weniger weit im Spectrum von einander stehen als Complementärfarben, so ist die Mischung eine der zwischenliegenden Farben und zieht desto mehr ins Weiße, je größer ihr Abstand ist, wird dagegen desto gesättigter, je kleiner ihr Abstand ist. Mischt man aber zwei Farben, die im Spectrum weiter von einander stehen als Complementärfarben, so erhält man Purpur oder solche Farben, die zwischen einer gemischten und dem entsprechenden Ende des Spectrums liegen, und um so gesättigter sind, je größer ihr Abstand ist. Dies ist ersichtlich aus der Mischfarbentabelle von Helmholtz.

	Violett	Indigo	Cyanblau	Blaugrün	Grün	Grüngelb	Gelb
Roth	Purpur	bl. Rosa	wß. Rosa	Weiß	wß. Gelb	Goldgelb	Orange
Orange	bl. Rosa	wß. Rosa	Weiß	wß. Gelb	Gelb	Gelb	
Gelb	wß. Rosa	Weiß	wß. Grün	wß. Grün	Grüngelb		
Grüngelb	Weiß	wß. Grün	wß. Grün	Grün			
Grün	wß. Blau	Waßerblau	Blaugrün				
Blaugrün	Wasserblau	Wasserblau					
Cyanblau	Indigo						

Jede angeführte Mischfarbe entsteht durch Zusammenbringen der Farbe am Anfange derselben horizontalen und derselben verticalen Colonne; wß. bedeutet weißlich, bl. dunkel. Durch Mischung von mehr als zwei Spectralfarben oder von Mischfarben entstehen keine neuen Farben mehr, sondern nur weniger gesättigte Stufen der angeführten.

Wenn wir nun auch im gewöhnlichen Leben manche der genannten Farben und ihre mehr oder weniger gesättigten und mehr oder weniger lichtstarken Abstufungen mit eigenen Namen belegen, wenn wir z. B. ein lichtschwaches Weiß Grau nennen, ein lichtschwaches Gelb Braun, ein lichtschwaches Roth Rothbraun, ein weißliches Blau Himmelblau, ein weißliches Roth Fleischroth u. s. w., so ergibt sich doch leicht, daß jeder Farbeneindruck sich erzeugen läßt durch eine gewisse Quantität einer gesättigten Spectralfarbe mit einer gewissen Quantität weißen Lichtes, daß demnach jeder Farbeneindruck von drei Größen abhängt: 1. der Wellenlänge des Farbentones, 2. der Quantität gesättigten Lichtes von diesem Tone und 3. der Quantität zugemischten weißen Lichtes, oder daß bei jeder Farbe drei Qualitäten ins Spiel treten: 1. die Farbe oder der Farbenton, 2. die Sättigung und 3. die Intensität ihres Lichtes. Hiernach kann man sämmtliche Farben in eine systematische Ordnung bringen, die sich am besten graphisch darstellen läßt, indem man nach Lambert die Farben in eine pyramidalische Kegelform ordnet. Auf dem Umfange der Grundfläche stehen die Spectralfarben und Purpur, in der Mitte weiß; auf den Radien gruppiren sich nach dem Rande hin die gesättigteren, nach der Mitte hin die weißlicheren Mischfarben. Die Spitze der Pyramide bildet das Schwarz und auf den Verbindungsstufen der Spitze mit den verschiedenen Stellen der Grundfläche bilden sich die lichtschwachen Abstufungen sowohl der Spectral- als der Mischfarben. In Fig. 184 ist der Versuch des Entwurfs einer solchen Farbenpyramide gemacht. Eine andere graphische Darstellung der Farbenmischung nach Newton beruht auf dem Princip der Schwerpunktsconstruction. Sollen dabei solche Quantitäten verschiedenfarbigen Lichtes als gleich groß auftreten, die dem Auge bei einer gewissen Lichtintensität als gleich hell erscheinen, so erhält die Curve die Gestalt Fig. 185. Purpur liegt hier auf der Sehne zwischen Roth und Violett, weil es eine Mischfarbe beider ist.

Weiß liegt in der geraden Verbindungslinie je zweier Complementärfarben und zwar von den gesättigteren Farben weiter weg als von den anderen, weil von den ersteren eine geringere Quantität erforderlich ist, und weil die geringere Quantität an einem größeren Hebelarme wirken muß. Die Mischung je zweier Farben gibt die auf dem kleineren Bogen zwischen ihnen in der Mitte stehende Farbe mit einer um so stärkeren Beimischung von Weiß, je weiter sie von einander abstehen. — Blau und Gelb mit Weiß gemischt geben blaß Violett und blaß Orange, Roth und Grün dagegen blaß Roth und blaß Grün; daraus folgt, daß das Tageslicht nicht absolut weiß, sondern röthlich ist (Aubert 1865).

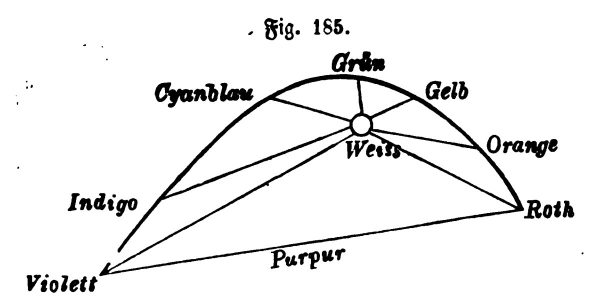
Fig. 184.



328

Die Farbentheorie (Young 1807, Goethe 1791). Sämmtliche Farbenerscheinungen, insbesondere aber die später zu betrachtenden physiologischen, erklären sich aus Youngs Farbentheorie. Derselbe nahm an, daß alle Farbenempfindungen aus dreien zusammengesetzt seien, wofür jede lichtempfindende Faser des Sehnerven aus drei Theilen bestehe; die Erregung der einen Faser gebe die Empfindung Roth, die der zweiten Grün, die der dritten Violett, wofür Maxwell Blau zu setzen vorschlägt. Indessen errege doch jedes Licht alle drei Fasern aber mit verschiedener Stärke; homogenes rothes Licht errege stark die rothempfindenden, schwach die anderen Fasern; einfaches Gelb errege mäßig stark die roth- und grünempfindenden Fasern, schwach die violetten, wodurch die Empfindung von Gelb entstehe (s. Mischfarbentabelle) u. s. w.; die Erregung aller drei Fasern in ziemlich gleicher Stärke gebe die Empfindung Weiß. Hieraus erklärt sich zunächst, warum dieselbe Farbenempfindung in verschiedener Weise erzeugt werden kann. Homogenes Gelb erregt die roth- und grünempfindenden Fasern, Roth und Grün erregen dieselben Fasern, bringen also auch den Eindruck von Gelb hervor. Nimmt man aus Sonnenlicht Roth heraus, so erregt die Mischung der übrigen vorzugsweise die zwei anderen Fasern; daher entsteht Blaugrün. Weiß entsteht durch Mischung aller Farben, weil dann alle Fasern gereizt werden; es ent-

Fig. 185.



steht auch durch hohe Intensität einer einzigen Farbe, weil mit dem stärkeren Reize einer Faser auch die schwache Erregung der übrigen sich steigert; es entsteht durch die drei Farben Roth, Grün und Violett, weil hierdurch alle drei Fasern gleichmäßig gereizt werden; es entsteht durch zwei Complementärfarben, weil durch die eine gewöhnlich eine der drei Fasern und durch die andere die zwei übrigen erregt werden, z. B. durch Roth die rothempfindenden und durch Grünlichblau die grün- und violettempfindenden Fasern. — Wenn nun auch nach den neueren Fortschritten der Physiologie des Auges (333.) die drei Fasern durch drei verschiedene Gruppen von Außengliedern der Zapfen ersetzt werden müssen, so ändert dies doch das Wesen von Youngs Theorie nicht.

Goethe, der die Wirklichkeit des schönen Scheines der Farben nicht entbehren wollte, verwarf Newtons Farbenlehre, insbesondere auf Grund der bekannten Thatsache, daß durch ein Prisma eine weiße Fläche nicht ganz mit Regenbogenfarben bedeckt, sondern nur gesäumt erscheint, und stützte eine neue Farbenlehre auf sein „Urphänomen." Dasselbe ist die schon angeführte Erscheinung, daß manche trübe Medien vor helleren Gegenständen gelb, vor dunkeln blau aussehen, was sich durch Interferenz erklärt. Für Goethe bestanden daher nur zwei Farben: Gelb, d. h. Licht durch ein trübes Medium gesehen, Blau, d. i. Dunkelheit, durch ein trübes erleuchtetes Medium gesehen; bei größerer Dichte des Mediums spielen beide ins Röthliche, Blau durch Violett, Gelb durch Orange. Grün und Purpur seien Mischfarben. In ähnlicher Weise erklärt Goethe durch Verschiebung des hellen Prismenbildes eines weißen Streifens die farbigen Säume desselben. Dem großen Werthe gegenüber, den der Dichter selbst auf seine optischen Studien legte, will es sich nicht ziemen, seine Ansichten ganz zu übergehen, obwohl die Unrichtigkeit derselben einleuchtend ist. (Näheres Dove, Farbenlehre.)

Die Fluorescenz (Brewster 1833, Lommel 1871). Unter Fluorescenz versteht man die Erscheinung, daß manche Körper vom Beginne bis zum Schlusse ihrer Beleuchtung wie selbstleuchtend werden und ein Licht ausstrahlen, dessen Farbe gewöhnlich sowohl von der Farbe des auffallenden Lichtes als auch von der Eigenfarbe des Körpers verschieden ist. Läßt man z. B. auf eine an sich gelbe Schrift von Bariumplatincyanür blaues Licht fallen, so leuchten die Züge in herrlichem Grün. Während die gewöhnlichen Körperfarben (nach 326.) von den bei der Absorption übrig bleibenden Strahlen herrühren, entstehen die Fluorescenzfarben gerade durch die absorbirten Strahlen. Absorbirt aber werden nach Kirchhoffs Absorptionsgesetz die Strahlen, welche dieselben Schwingungszahlen wie die Moleküle des Körpers besitzen, oder welche nach Lommels Erweiterung dieses Gesetzes höhere oder tiefere Octaven dieser Schwingungszahlen sind. Bei den meisten Körpern vollziehen die Moleküle bei gewöhnlicher Temperatur nur Schwingungszahlen unter 400 Billionen; die auffallenden Strahlen werden demnach von tieferen Octaven absorbirt, in dunkle Wärme verwandelt. Einzelne Körper aber enthalten auch Moleküle mit über 400 Billionen Schwingungen; durch die Absorption auftreffender gleicher Strahlen werden dieselben verstärkt und dadurch selbstleuchtend. Tritt dieses Selbstleuchten mit der Bestrahlung ein und hört mit derselben auf, so nennt man es Fluorescenz. Die Fluorescenzfarbe ist von der Farbe des auftreffenden Lichtes verschieden, weil die Moleküle der Körper auf verschiedene Schwingungszahlen abgestimmt sind, und weil bei der Erregung einer dieser Schwingungszahlen die übrigen mit entstehen und sich zu einer neuen Farbe vereinigen. Sie ist von der Eigenfarbe des Körpers verschieden, weil diese von den nicht absorbirten, sie aber von den absorbirten Farben herrührt. Entsteht sie nur durch diese und die gleichzeitig mit erregten leuchtenden Schwingungszahlen des Körpers, so heißt sie nach Lommel Fluorescenz durch *Resonanz*. Mischen sich aber Combinationsfarben ein, welche durch Zusammenwirkung dieser leuchtenden Schwingungszahlen und ultrarothen Octaven solcher nach dem Princip der Differenztöne entstehen, so tritt durchschnittlich eine *Verminderung der Schwingungszahl, der Brechbarkeit* ein, und es entstehen tiefere Farben; Lommel nennt diese Erscheinung Fluorescenz durch *Differenztöne*. 329

Der Name *Fluorescenz* wurde durch Stokes von dem Flußspathe oder Fluorcalcium abgeleitet, an dessen grünlichen Varietäten von Derbyshire man zuerst jenen blauen

Schiller sah, den jetzt Jeder am Steinöl beobachtet hat. Von festen Körpern sind noch ausgezeichnet durch schöne Fluorescenz das Uranglas und das Bariumplatincyanür; von Flüssigkeiten sind hervorragend Lösungen von Chininsulfat, Eosin, Magdalaroth, Aesculin (Auszug von Roßkastanienrinde), Chlorophyll oder Blattgrün (ätherischer Aufguß von Spinat, Brennnesseln u. dgl.), dann Lackmus- und Curcumatinctur, Stechapfelextract, Petroleum, Morin (Gelbholzextract mit essigsaurer Thonerde und Salzsäure versetzt) u. s. w. — Den Fluorescenzschiller dieser Körper sieht man schon im Tageslichte; deutlicher treten die Fluorescenzfarben auf, wenn man ein Bündel von Sonnenstrahlen durch eine Linse gehen und den aus derselben tretenden Strahlenkegel in einen der genannten Körper eindringen läßt; derselbe zeigt dann an der Eintrittsstelle eine lebhafte Farbe, die rasch an Intensität abnimmt; in dem an sich farblosen schw. Chinin, im Flußspath, Aesculin und Steinöl ist der Kegel blau, in dem gelben Uranglas, Curcumatinctur, Stechapfelextract, Morin grün, in dem grünen Chlorophyll roth, in dem rothen Eosin und Magdalaroth gelb. Ein hübscher Fluorescenzversuch wird auf folgende Weise angestellt: Man füllt etwa die Hälfte eines Reagensglases mit einer angesäuerten, wässerigen Lösung von Chininsulfat und gießt darauf eine ätherische Lösung von Chlorophyll, so erscheint das Glas im durchgehenden Lichte farblos und grün, im reflectirten Lichte himmelblau und blutroth.

In den meisten Fällen wird die Fluorescenz durch die höheren Schwingungszahlen hervorgerufen. Läßt man das Lichtbündel vor seinem Eintritte in die Aesculinlösung erst durch ein rothes Glas gehen, so entsteht der blaue Kegel nicht. Die Fluorescenzmappe besteht aus einer blauen und einer rothen Glasscheibe, die mappenartig zusammengeheftet sind, und zwischen denen ein Blatt mit Schriftzügen von Bariumplatincyanür liegt; fällt Licht durch das rothe Glas auf dieselben, so sind sie unsichtbar; geht aber das Licht durch das blaue Glas, so leuchten die Züge grün. Geht das auf Uranglas fallende Bündel vorher durch eine Lösung von Chlorkupfer, so bleibt der grüne Kegel aus. Läßt man auf eine Tafel von Uranglas oder einen Streifen Curcumapapier oder auf ein mit Chininlösung gefülltes längeres rechteckiges Glasgefäß ein durch ein Quarzprisma erzeugtes Sonnenspectrum fallen, so zeigt sich die Fluorescenzfarbe erst an der Stelle der höheren Spectralfarben und erstreckt sich oft weit bis in das Ultraviolette, wo sich dann deutlich ebenfalls die Fraunhofer'schen Linien L bis S erkennen lassen. Weil in allen diesen Fällen die Fluorescenzfarbe niedrigere Schwingungszahlen als die erregenden Farben besitzt, so hielt Stokes die Fluorescenz überhaupt für eine Erniedrigung der Schwingungszahl, für eine Verminderung der Brechbarkeit. Nach Lommel bildet das Chlorophyll hiervon eine Ausnahme; seine blutrothe Fluorescenz wird zwar auch von allen höheren Spectralfarben erregt, am stärksten aber von der gleichen Spectralfarbe. Das Magdalaroth aber zeigt geradezu die entgegengesetzte Erscheinung; füllt man eine Lösung dieses Stoffes in ein rechteckiges Glasgefäß und läßt auf eine Oberfläche derselben ein Sonnenspectrum fallen, so entsteht die orangegelbe Fluorescenz schon im rothen Theile des Spectrums, wodurch hier eine Erhöhung der Schwingungszahl unverkennbar ist. Das Charakteristische der Fluorescenz liegt also nicht in der Erniedrigung der Schwingungszahl, wie man bisher annahm; ebenso wenig ist hiermit eine Erklärung der Erscheinung gegeben. Eine ausreichende Theorie der Fluorescenz darf demnach nicht hierauf das Hauptgewicht legen, sondern muß, wie es von Lommel geschah, die Gesetze der Absorption als Grundlage benutzen.

Denn mit der Fluorescenz ist immer Absorption verbunden. Schon die rasche Abnahme der Farbe des Lichtkegels zeigt, daß durch die Fluorescenz die wirksamen Strahlen verbraucht werden. Deutlicher erhellt dies aus dem Spectralversuche: Die Spectralfarben, die keine Fluorescenz erregen, gehen ungeschwächt durch das rechteckige Glasgefäß, die wirksamen aber verschwinden. Vergleicht man das Absorptionsspectrum irgend einer Flüssigkeit mit dem fluorescirenden Spectrum auf dem rechteckigen Gefäße, so wird die Entstehung der Fluorescenz aus den absorbirten Strahlen unverkennbar; wo der erste Schimmer von Fluorescenz auftaucht, beginnt auch die Absorption; jedem Maximum der Absorption entspricht auch ein Maximum der Fluorescenz, und wo im Absorptionsspectrum die dunkeln Stellen aufhören, endigt auch die Fluorescenz. Lommel legt daher seiner Fluorescenztheorie die Absorption des Lichtes zu Grunde, welche bekanntlich in dem Uebergange der Aetherschwingungen auf die Körpermoleküle beruht. Wie aber ein Ton nur auf einen gleichgestimmten Resonanzkörper übergeht, so können auch Aetherschwingungen nur auf Moleküle übergehen, die auf dieselbe Schwingungszahl abgestimmt sind, oder welche, da in festen und flüssigen Körpern die Moleküle schon schwingen, dieselbe Schwingungszahl aber mit so kleinen Amplituden vollziehen, daß dieselben keinen Lichteindruck machen können. Nach Lommels mathematischen Untersuchungen erleidet dieses Kirchhoff'sche Absorptionsgesetz hier aber die Ausnahme, daß die Lichtstrahlen nicht blos die gleichen Schwingungszahlen der Moleküle, sondern auch die halb und doppelt so großen verstärken, falls dieselben oder darauf abgestimmte Moleküle vorhanden sind, daß also auch die tieferen und höheren Octaven der ab-

sorbirten Farben in dem Körper entstehen. Den Uebergang auf gleiche Schwingungszahlen nennt Lommel directe Absorption, den Uebergang auf die Octaven indirecte Absorption. Außerdem stellt derselbe die Hypothese auf, bei jeder Erregung würden nicht blos die gleichen Schwingungszahlen und die Octaven verstärkt und erzeugt, sondern alle, die der Körper überhaupt vollbringen kann; als Analogie werden die tönenden Platten angeführt, welche ebenfalls bei jeder Erregung alle Haupt- und Nebentöne gleichzeitig ergeben. Es wurde schon öfter darauf hingewiesen, daß in festen und flüssigen Körpern die Moleküle mit verschiedener Kraft in ihrer Lage verharren, also auch in verschiedene Schwingungszahlen gerathen müssen, und zwar wegen ihres innigen Zusammenhanges gleichzeitig. So enthält ein weißglühender Körper alle nur denkbaren Schwingungszahlen; bei niedriger Temperatur mag die Anzahl der vorhandenen Schwingungszahlen wohl beschränkter sein; zugegeben kann jedoch werden, daß sie ebenfalls immer gleichzeitig erregt werden. Nach diesen Prämissen wird die Erklärung der Fluorescenz einfach.

Zunächst betrachten wir die Fluorescenz durch Resonanz, welche bis jetzt hauptsächlich am Magdalaroth, Eosin und Chlorophyll bekannt ist. Das Magdalaroth läßt nur die dunkeln rothen Strahlen durch, absorbirt also alle übrigen Spectralfarben; seine Moleküle schwingen aber nur in den Schwingungszahlen des höheren Roth, des Orange und des Gelb, sowie in den tieferen Octaven der höheren Farben. Wenn daher auf das rechteckige mit Lösung des Stoffes gefüllte Gefäß ein Sonnenspectrum fällt, so geht das äußerste Roth ungeschwächt durch; das höhere Roth dagegen wird absorbirt und verstärkt direct die gleichen Schwingungszahlen der Lösung, sowie auch die orangefarbigen und gelben; ganz genau dasselbe thun auch die orangen und gelben Strahlen. Die höheren Strahlen können zwar in der Lösung die ihnen gleichen Schwingungszahlen nicht erregen, weil die Moleküle nicht darauf abgestimmt sind; dafür erregen sie die tieferen Octaven derselben, und diese bringen dann ebenfalls rothe, orange und gelbe Schwingungszahlen hervor, die sich zu Orange vereinigen. So zieht sich fast durch das ganze Sonnenspectrum, vom höheren Roth bis in das Ultraviolett dieselbe orangegelbe Fluorescenz, welche überall mittels des Spectroscops in Roth, Orange und Gelb zerlegt wird. Die Fluorescenz des Magdalarothes ist also Fluorescenz durch Einklang bei den rothen, orangen und gelben Strahlen, bei den übrigen ist sie Fluorescenz durch die Octave.

Viel häufiger ist die Fluorescenz durch Differenztöne oder richtiger gesagt Differenzfarben; als Muster gelte die des farblosen Aesculins. Dasselbe läßt alle Farben durch mit Ausnahme der dunkelblauen, violetten und ultravioletten Strahlen, absorbirt also nur diese, enthält in seinen Molekülen nur die Schwingungszahlen derselben und deren tiefere Octaven. Fällt daher auf eine Oberfläche der Lösung ein Sonnenspectrum, so gehen sämmtliche tiefere Farben ungeschwächt durch die Lösung, die violetten und ultravioletten dagegen erregen die Moleküle zu gleich vielen oder halb so vielen stärkeren Schwingungen, so daß die Flüssigkeit blau und violett leuchtet. Außerdem aber bilden diese, wie die ultravioletten Schwingungen mit den tieferen Octaven Combinationsfarben, deren Schwingungszahl gleich der Differenz der Schwingungszahlen der beiden combinirenden Farben ist und daher eine niedrigere Schwingungszahl, eine tiefere Farbe liefert. So erzeugt ein Ultraviolett von 900 Billionen Schw. mit einem Ultraroth von 400 Billionen die Differenzfarbe Orange von 500 Bill. Schw., daher enthält die Fluorescenz des Aesculins zahlreiche Farben, vom Roth bis zum Violett, die ersteren als Differenzfarben sehr schwach, die letzteren viel stärker und daher zu einem hellen Blau gemischt, in welchem durch ein Spectroskop alle Farben erkannt werden. — Für diese Fluorescenz durch Differenzfarben, welche bei Weitem die häufigste ist, gilt natürlich die Stokes'sche Regel, daß das Fluorescenzlicht weniger Schwingungen, geringere Brechbarkeit, als das erregende Licht hat, da die Differenz immer kleiner ist als der Minuend, womit auch diese bisher räthselhafte Regel erklärt ist.

Die Phosphorescenz (281.) unterscheidet sich von der Fluorescenz hauptsächlich hinsichtlich der Zeit; sie tritt erst nach dem Beginne der Bestrahlung ein und verlöscht erst nach dem Aufhören derselben; wenn daher die Fluorescenz mit der Resonanz verglichen werden kann, so findet die Phosphorescenz ihre Analogie in dem Mittönen. Doch gibt es auch noch andere Unterschiede. Die Fluorescenz entsteht nur durch Bestrahlung, die Phosphorescenz aber auch durch Erwärmung, mechanische Processe u. s. w.; die Fluorescenzfarbe eines Körpers ist immer dieselbe, die Phosphorescenzfarbe aber ändert sich oft mit der Temperatur, oft mit der physikalischen Beschaffenheit, mit der Darstellungsweise des Körpers, mit der Farbe des erregenden Lichtes; die Fluorescenz zeigt sich, abgesehen von den Fraunhofer'schen Linien, an allen Stellen des wirksamen Spectrumtheils, die Phosphores- 330

cenz wird manchmal an einzelnen Stellen des Spectrums erregt, manchmal durch das Ultraroth verlöscht. Beide stimmen darin überein, daß die Bestrahlung durch die violetten und ultravioletten Strahlen vorzugsweise wirksam ist, und daß die Schwingungszahl häufig erniedrigt wird. Wären die Beiden nur in der Zeit verschieden, so dürfte man den Grund des Unterschiedes darin suchen, daß die Moleküle der fluorescirenden Körper die Aetherschwingungen leicht aufnehmen könnten und daher eben so rasch wieder abgeben müßten, während die Moleküle der phosphorescirenden Körper die Aetherschwingungen nur allmälig annehmen und daher ihre Bewegung auch nur allmälig wieder abgeben könnten. Daraus würde dann zu schließen sein, daß die fluorescirenden Körper nicht phosphoresciren und umgekehrt, was nur mit Ausnahmen zutrifft.

Schwefelstrontium phosphorescirt violett bei gewöhnlicher Temp., blau bei 40°, grün bei 70, gelb bei 100, rothgelb bei 200°. — Isländischer Kalkspath mit Schwefel geglüht gibt einen gelb leuchtenden, Arragonit einen grün leuchtenden Phosphor. — Ein Schwefelstrontium phosphorescirt nur im ganzen Ultraviolett, ein anderes im Blau, Violett und im äußersten Ultraviolett, dagegen nicht in dem an das Violett grenzenden Theile desselben; bringt man einen leuchtenden Streifen von Papier, das mit phosphorescirendem Blendepulver bedeckt ist, in das Ultraroth, so verlöscht das Licht mit Ausnahme einiger Streifen, welche wohl die Stellen von Fraunhofer'schen Linien im Ultraroth anzeigen. — Ein Schwefelstrontium fluorescirt in demselben Lichte, in welchem es phosphorescirt; Chinin fluorescirt blau, phosphorescirt aber gelb, doch nur sehr kurze Zeit.

Die Calcescenz. Wie Phosphorescenz durch Erwärmung entsteht, so könne, vermuthete Emsmann 1859, auch eine negative Fluorescenz stattfinden, d. i. eine Lichterzeugung durch Erhöhung der Schwingungszahl von dunkeln Wärmestrahlen, die auf einen Körper fallen. Tyndall und Akin glaubten 1864 die Existenz solcher Erscheinungen nachgewiesen zu haben. Durch folgenden Versuch wird nun allerdings Licht mittels dunkler Wärmestrahlen erzeugt. Läßt man ein Strahlenbündel elektrischen Kohlenlichtes auf einen Hohlspiegel fallen und setzt zwischen den Spiegel und den Brennpunkt ein Gefäß mit Jodlösung, so gelangen in den Brennpunkt nur die ultrarothen Strahlen; dünne Platinbleche, Kohlenstückchen, Zinnstreifen in den Brennpunkt gebracht, werden leuchtend. Tyndall nannte die Erscheinung Calorescenz, weil sie von der Wärme herrührt, Akin aber Calcescenz, vermuthlich weil die Entstehung des Drummond'schen Kalklichtes, wie überhaupt jeder Gluth in den nichtleuchtenden Flammen als eine Erhöhung der Schwingungszahl aufzufassen ist. Wenn nun auch bei solchen Erscheinungen eine Erhöhung der Schwingungszahl eintritt, so sind sie doch, wie Bohn 1867 einwarf, keine negative Fluorescenz; denn die Fluorescenz beginnt und endigt mit der Bestrahlung, während jene Erscheinungen später beginnen und später aufhören, und außerdem eine Folge der Temperaturerhöhung durch dunkle Wärme sind. Es ist daher gewiß geeignet, dieselben unter einem neuen Namen zusammenzufassen. Negative Fluorescenz im wahen Sinne des Wortes ist aber noch nicht gefunden, wenn man nicht die Erregung von gelben und grünen Strahlen durch Orange in der Fluorescenz des Magdalarothes dahin rechnen will.

331 **Die anomale Dispersion** (Kundt 1871). Körper mit Oberflächenfarben haben die Eigenschaft, niedrige Farben wie Roth, Orange, Gelb, statt schwächer, stärker zu brechen als die höheren Farben z. B. Blau und Violett; das Spectrum solcher Körper beginnt gewöhnlich mit den höheren Farben Blau und Violett, zeigt dann eine dunkle Lücke, und enthält am stärker gebrochenen Ende die niedrigen Farben Roth bis Gelb. Diese Eigenschaft der Körper mit Oberflächenfarben, niedrige Schwingungszahlen gegen die Regel stärker zu brechen als höhere, nennt man die anomale Dispersion. Körper mit Oberflächenfarben sind solche, die im reflectirten Lichte mit anderer Farbe erscheinen als im durchgelassenen, bei denen also die Körperfarbe nicht erst nach einer Absorption in den obersten Molekülschichten durch Reflexion gebildet wird, da sonst im reflectirten Lichte dieselbe Farbe wie im durchgelassenen erscheinen müßte, sondern welche ihre Farbe durch Reflexion an der äußersten Grenzfläche erhalten, wodurch der Name Oberflächenfarbe erklärlich ist. Diese starke Reflexion ist nur dadurch erklärlich, daß diese Körper für jene Farben totale Reflexion, also sehr große Brechungsexponenten besitzen, und dies ist nur dadurch möglich, daß die Geschwindigkeit dieser Farben in dem Körper sehr

gering ist, daß also das Licht sich so gut wie nicht durch diese Körper fortpflanzt, was wieder nur dann erklärlich ist, wenn die Körper für jene Farben eine sehr starke Absorption besitzen. Kundt hat nun in der That gezeigt, daß die Körper mit Oberflächenfarben gerade diese Farben total absorbiren, und daß der Brechungsexponent derselben unendlich groß ist; an dieser Vergrößerung des Brechungsexponenten haben aber nicht nur die absorbirten, sondern auch die niedrigeren Farben Antheil, wodurch sich ihre stärkere Brechung erklärt.

Leroux hatte schon 1862 gefunden, daß Joddampf die rothen Strahlen stärker bricht als die blauen; außerdem hatte schon Cauchys Dispersionstheorie in Verbindung mit Jamins Versuchen über die Metallfarben ergeben, daß auch die Metalle die umgekehrte Dispersion der durchsichtigen Körper besitzen. Endlich beobachtete Christiansen (1870), daß eine alkoholische Lösung von Fuchsin, in ein sehr spitzes Hohlprisma gebracht, ein anomales Spectrum erzeugt, das mit Blau und Violett beginnt, in welchem Grün fehlt, und das mit Roth und Gelb endigt; er bestimmte auch die Brechungsexponenten einer concentrirten Lösung und fand dieselben für Roth 1,450, Gelb 1,516, Blau 1,338, Violett 1,374. Kundt kam sogleich, wahrscheinlich durch die obige Schlußweise geleitet, auf den Gedanken, die anomale Dispersion in allen Körpern mit Oberflächenfarben zu vermuthen, und fand diese Vermuthung durch zahlreiche Versuche überall bestätigt.

Oberflächenfarben sind auch im gewöhnlichen Leben z. B. am festen Indigo bekannt, der aus einer rauhen Oberfläche, also aus seinem Inneren die bekannte blaue Farbe schickt, die er auch in Lösung zeigt, an einer glatt geriebenen Oberfläche aber ein complementäres Orangeroth zeigt, das eben als Oberflächenfarbe metallisch, wie kupferroth aussieht. Da die Oberflächenfarbe nach obigem Schlusse auch absorbirt wird, so kann sie in dem durchgegangenen Lichte nicht mehr enthalten sein; daher ist die Oberflächenfarbe wie beim Indigo der inneren oder durchgelassenen complementär; läßt man auf einer Glasplatte eine Lösung des Fuchsins rasch verdunsten, so erscheint dieselbe im reflectirten Lichte grün, im durchgelassenen roth. Auch alle Anilinfarben, sowie Kaliumpermanganat haben den falschen Schiller der Oberflächenfarben und bewirken alle nach Kundt eine anomale Dispersion. Da diese Körper nur in den dünnsten Schichten durchsichtig sind, so kann man ihr Spectrum nur an der Kante eines sehr spitzwinkeligen Prismas untersuchen, was indessen eine neue Beobachtungsmethode von Soret nicht nöthig macht.

In dem anomalen Spectrum, das nach diesen Methoden erhalten wird, fehlt immer die Oberflächenfarbe, wodurch nachgewiesen ist, daß sie absorbirt wird, daß also ihre Geschwindigkeit in dem Körper sehr gering ist. Hierdurch wird der Brechungsexponent $c : c'$ sehr groß, für c' gleich Null sogar unendlich. Wirklich zeigen die Untersuchungen Kundts, daß die Brechungsexponenten der niederen Farben nach der absorbirten Farbe zu sehr rasch wachsen, daß ihre Dispersionscurve gegen die Lücke zu fast asymptotisch ansteigt. Sellmeier hatte eigentlich die ganze Erscheinung schon 1866 theoretisch vorausgesagt, indem er von dem Gedanken ausging, daß die Absorption ein Uebergang auf die Körpermoleküle sei und daß mit derselben eine unendliche Erhöhung des Brechungsexponenten für die absorbirten Farben verbunden sein müsse, woraus er schloß, daß auch die Brechungsexponenten der niederen Farben erhöht und der höheren erniedrigt würden.

Chemische Wirkung des Lichtes. Wie bei der gewöhnlichen Absorption des Lichtes eine Verwandlung von Licht in Wärme stattfindet, so ist auch eine Verwandlung von Licht in Arbeit denkbar, d. h. die Aetherschwingungen können, indem sie auf Körperatome übergehen, diese Atome weiter von einander entfernen und dadurch eine chemische Zersetzung bewerkstelligen. Indeß ist es auch möglich, daß durch die Aetherschwingungen die Körperatome ebenfalls in Schwingungen versetzt werden, und daß hierdurch insbesondere die fortschreitenden Gasatome noch schwingende Bewegungen annehmen; dies kann die Folge haben, daß in Gemengen verschiedener Gase die verschiedenen Atome einander genähert werden und sich dann einander festhalten. So können durch Licht auch chemische Verbindungen befördert werden. Unter welchen Umständen diese Erscheinungen stattfinden, hängt von der materiellen Verschiedenheit ab, deren Wesen uns unbekannt ist. 332

Chemische Zersetzungen durch das Licht sind: das weiße Chlorsilber wird durch das Licht geschwärzt, indem das Chlor entweicht und das Silber in kleinsten Theilchen zurückbleibt; wenn das Licht nur kurze Zeit auf das Chlorsilber eingewirkt hat, so wird dasselbe von reducirenden Stoffen leichter zersetzt als vom Lichte unberührtes Silbersalz; ähnlich

verhält sich Jodsilber; hierauf beruht die Photographie. Salpetersäure wird im Lichte gelb, nach längerer Zeit roth, weil sie sich in Stickstoffdioxyd und Sauerstoff zersetzt. Organische Stoffe zersetzen sich unter dem Einflusse des Lichtes, indem ihr Kohlenstoff und ihr Wasserstoff sich mit dem Sauerstoff der Atmosphäre verbinden; hierauf beruht das Bleichen, sowie manche andere Farbenänderung im Lichte. Die wichtigste zersetzende Lichtwirkung ist die Zersetzung des Kohlendioxyds der Luft an der Oberfläche der Pflanzen; der Sauerstoff kehrt in die Luft zurück, der Kohlenstoff tritt in die Pflanzen als Hauptnahrungsmittel derselben ein.

Chemische Verbindungen durch das Licht sind: Chlorgas und Wasserstoff im Dunkeln gemengt verbinden sich unter Explosion, wenn Sonnenlicht auf das Gemenge fällt. Chlorwasser wird allmälig zu Salzsäure, während stets Sauerstoffbläschen aufsteigen, indem sich das Chlor mit dem Wasserstoff des Wassers verbindet und dadurch den Sauerstoff frei macht. Im Lichte entsteht das Chlorophyll (Blattgrün) der Pflanzen, vom Lichte wird das Solanin in den weißen Kartoffelkeimen zerstört u. s. w.

Die chemisch wirksamen oder aktinischen Strahlen sind (Fig. 179) hauptsächlich die blauen, etwas weniger die violetten, und dann die ultravioletten Schwingungszahlen. Mittels ihrer chemischen Wirkung hat J. Müller das Spectrum photographirt; sein photographisches Spectrum beginnt erst bei der Linie G und läßt die Fraunhofer'schen Linien im Ultraviolett deutlich hervortreten. Die ausgezeichnetste Photographie eines Spectrums hat jedoch Henry Draper (1873 und 74) ausgeführt; dieselbe enthält nicht nur eine große Zahl von Linien im Ultraviolett, sondern auch die Linien des leuchtenden Spectrums, ja sogar des ultrarothen Spectrums. Henry Draper erinnert hierbei daran, daß sein Vater J. W. Draper schon vor 30 Jahren gezeigt habe, die aktinische Kraft der Sonnenstrahlen erstrecke sich unter geeigneten Umständen über das ganze Spectrum; so werde z. B. Kohlendioxyd von den Pflanzen am stärksten in der gelben Region zersetzt; dem entspricht die Beobachtung von Sachs (1865), nach welcher das Ergrünen des Chlorophylls ebenso stark unter der Wirkung der rothen und gelben Strahlen stattfinde als unter dem Einflusse der blauen, und die Mittheilung Becquerels, daß eine jodirte Silberplatte nach vorausgegangener Belichtung alle Farben des Spectrums abbilde. Nach Versuchen Vogels (1873) ist eine nasse Bromsilberplatte allerdings im Blau am empfindlichsten gegen das Licht, und erstreckte sich die Wirkung von da bis ins Grün; eine trockene Platte aber zeigte im Allgemeinen eine schwächere Wirkung, jedoch erstreckte sich dieselbe, immer schwächer werdend, bis ins Orange. Als aber das Bromsilber mit Stoffen gemengt wurde, welche bestimmte Strahlen z. B. Gelb oder Roth absorbiren, ergab sich in diesen Farben eine ebenso starke Zersetzung wie im Blau. Durch solche Versuche würde ein Ausspruch Lommels bestätigt, nach welchem überhaupt diejenigen Strahlen am wirksamsten sein sollten, welche am stärksten absorbirt würden und zugleich die an ihrer Wärme erkennbare stärkste lebendige Kraft besäßen. Nach dieser leicht erklärlichen Meinung müßte die Wirkung der Pflanzen auf das Kohlendioxyd am stärksten im Roth zwischen B und C sein, weil diese Strahlen am stärksten von dem Chlorophyll absorbirt werden, und weil die außerdem noch absorbirten blauen und violetten Strahlen eine geringere lebendige Kraft besitzen. Diese Folgerung Lommels, welche den Resultaten Drapers widerspricht, wurde durch Versuche von Lommel und N. Müller bestätigt; Pfeffer (1871—73) hält jedoch diese Versuche für ungenügend, bestätigt durch neue Versuche die Angaben Drapers und präcisirt dieselben dahin, daß die relativen Assimilationswerthe der einzelnen Spectralfarben für die Pflanzen in einem wesentlich gleichen Verhältnisse zu einander stehen wie die Helligkeitsempfindungen unseres Auges für die gleichen Farben. Das Gelb des Spectrums habe die stärkste Leuchtkraft, es habe auch die stärkste Wirkung auf die Pflanzen. Die Entscheidung über diese Streitfrage ist abzuwarten.

7. Das Auge und die optischen Instrumente.

Physiologische und practische Optik.

333 **Der Bau des Auges.** Bei den niedersten Thieren, welche meist keine andere Lichtempfindung als Hell und Dunkel haben, besteht das Auge nur aus einem Augenpunkte, dem peripherischen Ende eines lichtempfindenden Nerven, das dem Lichte zugänglich unter durchsichtigen Decken liegt. Damit durch ein Auge Gestalten unterschieden werden können, muß das Licht, das von gesonderten leuchtenden Punkten ausgeht, auch gesondert d. h. mittels verschiedener Nervenfasern wahrgenommen werden. Zu diesem Zwecke führt bei vielen wirbellosen Thieren

zu jeder lichtempfindenden Nervenfaser ein kegelförmiger, durchsichtiger Gallertkörper, welcher durch eine undurchsichtige Scheidewand, die Pigmentscheide, von den anderen ganz gleichen Körpern, deren Zahl bis zu 25000 steigt, getrennt ist, und daher auch nur die Strahlen eines Punktes und zwar desjenigen, der in seiner Richtung liegt, auf das zugehörige Nervenende führt. Da die Pigmentscheiden sich bis an die äußere Grundfläche dieser Gallertkegel, der sogenannten Glaskörper, erstrecken, so erscheinen solche Augen von außen in überaus kleine Felder getheilt, facettirt; sie heißen daher Facetten-Augen oder auch zusammengesetzte Augen. Bei einigen wirbellosen Thieren dagegen, sowie bei den Wirbelthieren und bei den Menschen geschieht die Scheidung des Lichtes durch Brechung an gekrümmten Flächen durchsichtiger Medien; solche Augen heißen einfache Augen.

Das menschliche Auge liegt in Form einer Kugel, Augapfel genannt, in lockeres Fettzellgewebe eingebettet, in der knöchernen Augenhöhle, welche die Form eines Kegels hat; der Augapfel wird von sechs Muskeln bewegt und durch die Augenbrauen, Augenlider und Augenwimpern geschützt. Die hintere Haut der Augenlider, die Bindehaut (Conjunctiva) ist locker an den Augapfel geheftet, außerordentlich empfindlich gegen die leiseste Berührung des kleinsten, fremden Körperchens und sucht ein solches durch unwillkürliche Bewegungen der Lider, das Blinzeln, zu entfernen, mit Beihilfe der Feuchtigkeiten, welche von ihren eigenen Schleimdrüsen, den Fett aussondernden Meibom'schen Drüsen und den Thränendrüsen bereitet werden, und welche die Vorderfläche des Augapfels stets rein und glänzend erhalten.

Die Hülle des Augapfels wird von drei Hautsystemen gebildet, der festen Kapsel, der Uvea oder Traubenhaut und der Retina oder Netzhaut. Der Inhalt besteht aus drei Feuchtigkeiten, der wässerigen Feuchtigkeit, der Krystallinse und dem Glaskörper.

Fig. 186 stellt einen horizontalen Querschnitt des Auges vor, wodurch die drei Hautsysteme und die drei Feuchtigkeiten sichtbar werden. 1. Die feste Kapsel besteht in ihrem größeren hinteren Theile aus der undurchsichtigen, harten, weißen Sehnenhaut s (Sclerotica) und in dem kleineren vorderen Theile aus der durchsichtigen, knorpeligen, farblosen Hornhaut h (Cornea). Die Sehnenhaut ist der stärkste Theil der drei Hautsysteme, schützt die Haupttheile und wird durch ein äußerst dichtes und straffes Geflechte von leimgebenden Bindegewebfasern gebildet; äußerer Durchmesser ca 24mm, Dicke ca 1/2mm. Die ebenso dicke Hornhaut, von der Form eines stark gekrümmten Uhrglases, ist vorn in die Sehnenhaut eingesetzt und besteht aus 3 Schichten, dem äußeren aus Hornzellen gebildeten Epithelium (in der Fig. ausgezogen), der starken Knorpelschicht (weiß gelassen) und der Descemet'schen Haut, einer glasartigen dünnen Lamelle (gestrichelt). 2. Das System der Uvea (in der Fig. schwarz) zerfällt in den hinteren, die Innenwand der Sehnenhaut auskleidenden Theile adda, die Aderhaut oder Chorioidea, und in den vorderen, mehr ebenen, hinter der Hornhaut gelegenen, aber von dieser etwa um 4mm abweichenden Theil irri, die Regenbogenhaut oder Iris; diese hat in der Mitte eine kreisförmige Oeffnung, das Sehloch oder die Pupille rr. — Die Aderhaut ist eine dünne, aus Blutgefäßen und strahligen Zellen gewebte Membran, welche nach innen mit dunkeln Pigmentkörperchen ganz bedeckt und daher schwarz ist. An ihrem vorderen, inneren Rande bildet sie 70—72 starke, häutige Falten, die Ciliarfortsätze ac, deren vordere Ausläufer in meridianaler Richtung gegen die

Fig. 186.

Iris hingehen. An den vorderen, äußeren Rand der Aderhaut legt sich der Ciliarmuskel; wo dieser endigt und die Aderhaut an die Sehnenhaut festgewachsen ist, entspringt die Iris eine bewegliche, veränderliche Blendung für die Linse, an deren Vorderfläche sie mit ihrem mittleren Theile anliegt. Sie enthält wie der Ciliarmuskel organische d. i. dem Willen entzogene, nicht quer gestreifte Muskelfasern, welche man in zwei Muskeln zusammenfassen kann, den Ringmuskel und den Erweiterer der Pupille. 3. Die Netzhaut ist eine höchst dünne Ausbreitung von durchsichtiger Nervenmasse zwischen der Aderhaut und dem Glaskörper, in welcher sich die Fasern des Sehnerven verzweigen, der hinten etwas nach der Nase zu bei dd die Sehnenhaut und die Aderhaut durchdringt. Trotz ihrer außerordentlichen Dünnheit ($^1/_5$ bis $^1/_{10}$ mm) besteht die Netzhaut nach Henle doch aus 10 verschiedenen Schichten. Die innerste und oberste Schicht, die **Membrana limitans** hängt mit der Hülle des Glaskörpers, der Glashaut, zusammen; dann folgt eine aus den radialen Verzweigungen des Sehnerven bestehende Schicht, deren Fasern mit den Zipfeln der sternförmigen Zellen, aus denen die dritte Schicht besteht, zusammenhängen. Unter derselben lagern mehrere Körnerschichten, und die unterste oder äußerste Stelle an der Grenze der Aderhaut nimmt die wichtigste Schicht, die Stäbchenschicht, ein. Dieselbe besteht aus palissadenförmig, senkrecht zur Oberfläche neben einander stehenden Stäbchen von 0,07 mm L. und 0,002 mm D. und aus Zapfen, halb cylindrisch, halb kegelförmig, von etwas größerer Länge und 0,003 bis 0,009 mm Dicke. Von dem nach innen gekehrten Ende jedes Zapfens und jedes Stäbchens gehen höchst feine Fäden, die Müller'schen Fasern, durch die mittleren Körnerschichten nach den Zipfeln der Nervenzellenschicht, wodurch dieselben mit den Fasern des Sehnerven in Verbindung stehen. Nach neuesten Forschungen von Max Schultze enthält jedes Stäbchen und jeder Zapfen ein aus Nervensubstanz gebildetes Innenglied und ein aus zahlreichen durchsichtigen Plättchen bestehendes Außenglied. In der Stäbchenschicht geht die Lichtperception vor sich, und zwar scheinen die Stäbchen für die Lichtempfindung im Allgemeinen, die Zapfen für die Farbenempfindung bestimmt zu sein. Unter der Eintrittsstelle des Sehnerven sind natürlich keine Stäbchen und Zapfen; daher ist diese Stelle keiner Lichtempfindung fähig; sie heißt **blinder Fleck** oder **Mariotte'scher Fleck**. Von dem Vorhandensein desselben überzeuge man sich an Fig. 187: Man schließe das linke Auge, fixire mit

Fig. 187.



dem rechten das weiße Kreuzchen und bringe das Buch in eine Entfernung von 3 dm, so wird der weiße Kreis verschwinden. Eine andere Netzhautstelle von dem blinden Fleck nach den Schläfen zu hat im Gegentheile die schärfste Lichtempfindung; sie heißt wegen ihrer gelben Farbe der **gelbe Fleck**, enthält keine Nervenfasern, keine Gefäße und in der Stäbchenschicht nur Zapfen. Der Umfang des gelben Flecks ist sehr reich an Nervenzellen; die vertiefte Mitte desselben, die sogenannte Netzhautgrube dagegen ist auch hieran sehr arm; sie ist der Punkt, auf den die Strahlen desjenigen Punktes fallen, den wir scharf ins Auge fassen oder fixiren. Der vordere Rand der Netzhaut ist nicht mehr nervös, sondern membranös, ist hier mit der Aderhaut und dadurch mit der Sehnenhaut fest verwachsen, und besteht aus dem äußeren oder ciliaren Theil und dem inneren, den Ciliarfortsätzen folgenden Theil, der **Zonula Zinnii**, die in Form einer Halskrause sich über die Ciliarfortsätze hinaus erstreckt und sich in stark gewellter Linie an die Kapsel der Linse festsetzt. 4. Die Krystalllinse, die wichtigste Augenfeuchtigkeit, liegt direct hinter der Iris, besteht aus einem durchsichtigen, farblosen, elastischen Gallertkörper von der Gestalt einer biconvexen Linse, c. 4 mm dick, vorn etwas weniger gewölbt als hinten, und zwiebelartig aus concentrischen Schichten gebildet, deren Stoff ein eigenthümlicher Proteinkörper, das Globulin, ist. Sie wird von einer structurlosen, glashellen Membran, der Linsenkapsel, eingeschlossen, die mit der Glashaut und der Zonula verwachsen ist. 5. Die wässerige Feuchtigkeit (**humor**

aqueus), welche die vordere Augenkammer zwischen der Iris und der Hornhaut erfüllt, ist eine klare, farblose Flüssigkeit, bestehend aus Wasser mit 2% Kochsalz und Extractivstoffen. Eine hintere Augenkammer, die man früher zwischen der Iris und der Linse annahm, existirt nicht. 6. Der Glaskörper (humor vitreus) füllt den Raum zwischen der Linse und der Netzhaut, ist aber selbst von der Glashaut, einer höchst feinen Membran, umschlossen, die der Membrana limitans der Netzhaut überall anhaftet. Der Glaskörper bildet eine gallertige Masse von wenig Zusammenhang, gemischt aus Schleim und Flüssigkeit, die alkalisch reagirt und ca 2% Salze enthält.

Messungen am Auge, welche Berechnungen der Dimensionen möglich machen, stellte Helmholtz mit seinem Ophthalmometer (1854) an. Dasselbe besteht aus einem für kurze Distanzen eingerichteten Fernrohre, vor dessen Objectivglase neben einander zwei Glasplatten stehen, so daß die eine Hälfte des Objectivglases durch die eine, die andere durch die andere Platte sieht. Diese beiden Platten sind ein wenig gegen einander geneigt, wodurch zwei Bilder des zu messenden Auges, auf welches das Fernrohr gerichtet wird, entstehen; aus der Entfernung der zwei Bilder eines Punktes von einander und von den Bildern eines anderen Punktes kann die Entfernung der zwei Punkte von einander berechnet werden.

334 **Das Sehen** (Keppler 1600). Der Augenspiegel (Helmholtz 1851). Das Sehen eines Gegenstandes geschieht dadurch, daß von demselben eigene oder reflectirte Lichtstrahlen ausgehen, in das Auge gelangen und durch die Häute und Feuchtigkeiten desselben gebrochen und auf der Netzhaut zu einem kleinen umgekehrten Bilde des Gegenstandes vereinigt werden. Die stärkste Brechung der Lichtstrahlen geschieht an der Hornhaut; die Strahlen eines entfernten leuchtenden Punktes würden sich 10mm hinter der Netzhaut mittels der Brechung allein an der Hornhaut vereinigen; aber auch noch an der vorderen und hinteren Fläche der Krystalllinse, sowie an den Schichtflächen derselben finden Brechungen statt, wodurch die Vereinigung auf der Netzhaut bewirkt und das Bildchen erzeugt wird. Von dem Vorhandensein desselben überzeugt man sich mittels des Augenspiegels, durch welchen man von vorn in das Auge hineinsehen, die Netzhaut selbst mit ihren Gefäßen und die auf ihr entworfenen optischen Bilder deutlich wahrnehmen kann. Mittels dieses wichtigen Instrumentes sieht man auch, daß derjenige Gegenstand, welcher von dem beobachteten Auge speciell betrachtet wird, sein Bild auf der Netzhautgrube hat, und daß dieses Bild einen besonders hellen Reflex an dem Punkte zeigt, den das beobachtete Auge an dem betrachteten Gegenstande fixirt; endlich erlaubt der Augenspiegel noch die Beobachtung, daß die Netzhautbilder der nicht betrachteten Gegenstände weniger scharf, nur leicht skizzirt sind; hierdurch erscheinen dieselben weniger deutlich, wozu indeß auch die geringere Empfindlichkeit der Netzhaut an den übrigen Stellen beiträgt, die von der geringeren Zahl von Stäbchen und Zapfen herrührt. Der ganze Umfang aller auf der Netzhaut abgebildeten Dinge bildet das Gesichtsfeld; beide Augen umspannen bei ruhigem Sehen in weite Ferne ein Gesichtsfeld von 180°, das durch die Bewegungen der Augen noch vergrößert wird. Durch das Licht der Netzhautbildchen wird ein Reiz auf die Netzhaut ausgeübt, der sich durch Fasern des Sehnerven in das Gehirn fortpflanzt und dort auf uns noch unbekannte Weise die Vorstellung des Sehens erweckt.

Der Reiz wird indeß nicht direct auf die Nervenfasern, die sich in der Netzhaut verzweigen, hervorgebracht; dies zeigt schon die Unempfindlichkeit des blinden Flecks, die ebenfalls mit dem Augenspiegel überzeugend dargethan werden kann; außerdem kann man aber auch die Schatten der in den inneren Netzhautschichten verlaufenden Gefäße wahrnehmen; folglich muß die lichtempfindende Schicht tiefer, mehr nach außen liegen, die Stäbchenschicht muß der Aufnahme des Lichtes dienen. Dies wird dadurch bekräftigt, daß der gelbe Fleck keine Nervenfasern, wohl aber zahlreiche Zapfen enthält, sowie dadurch, daß nach vielfachen Versuchen das Bild des kleinsten Zwischenraumes, den wir zwischen 2 ausgespannten Fäden wahrnehmen können, dem Abstande zweier neben einander liegenden Stäbchen entspricht. Ueber die Art der Lichtperception durch die Stäbchen und Zapfen besteht noch keine Gewißheit. Möglich ist es, daß hierbei Schultzes Plättchen in den Außengliedern der Stäbchen eine Rolle spielen, daß nämlich an den Grenzen dieser Plätt-

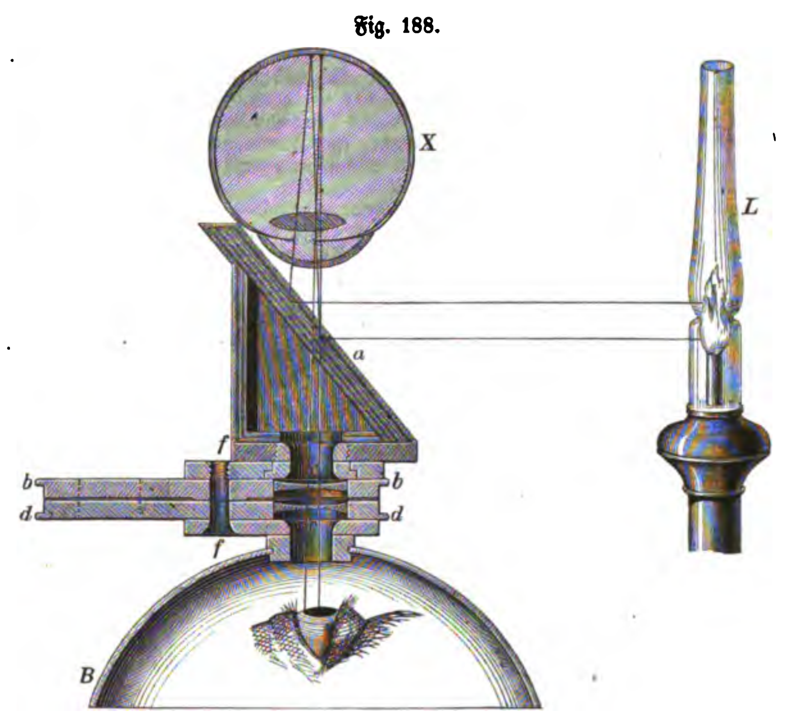
chen die Aetherwellen reflectirt werden und mit neu anlangenden Wellen zu stehenden Wellen interferiren, durch welche die Atome der Plättchen ebenfalls in Schwingungen gerathen müßten. Diese transversalen Schwingungen könnten sich dann auf die nervösen Innenglieder der Stäbchen übertragen und von diesen durch Müllers Fasern auf die Körner und Nervenzellen fortgepflanzt und dadurch verstärkt zu den Nervenfasern geleitet werden. Die verschiedenen Farben würden, da sie sich in der Wellenlänge unterscheiden, nur in verschieden dicken Plättchen stehende Wellen erzeugen können; demnach würde die Farbenperception darin beruhen, daß die Zapfen von den verschiedenen Farben an verschiedenen Stellen ihres kegelförmigen Gliedes erregt würden.

Der Augenspiegel beruht auf denselben Umständen, die die Schwärze der Pupille und das Augenleuchten erklären. Die Pupille solcher Augen, denen das schwarze Pigment nicht fehlt, erscheint schwarz, weil durch die vordere weiße Sehnenhaut und die darunterliegende geschwärzte Aderhaut kein Licht eindringen kann, und weil das durch die Pupille eintretende und das Bildchen erzeugende Licht nur auf demselben Wege zurückkehren und daher nur an der Stelle des Gegenstandes ein Bild dieses Bildchens erzeugen, nicht aber in ein seitlich beobachtendes Auge gelangen kann. Die Pupille von Albinos oder Kakerlaken, weißen Kaninchen und Mäusen erscheint roth, weil der Aderhaut das Pigment fehlt und daher Licht durch die Sehnenhaut und die Aderhaut dringen und die ganze Netzhaut erleuchten kann, so daß auch die in diesem Falle rothe Aderhaut beleuchtet ist; hält man durch einen Schirm dieses seitliche Licht ab, so erscheint auch die Pupille der Albinos schwarz. Bei diesen, wie auch manchmal bei blonden Menschen mit hellblauen Augen kann man von der Seite her durch die weiße Sehnenhaut hindurch das leuchtende Netzhautbildchen sehen; Hunde, Katzen u. a. Thiere, welche im Hintergrunde des Auges ein Tapetum, d. i. eine pigmentlose, spiegelnde Stelle haben, zeigen ebenfalls bei halbdunkler Beleuchtung einen hellen Lichtkreis im Auge; diese Erscheinungen nennt man das Augenleuchten. Indessen kann man auch die Pupille eines gewöhnlichen Menschen roth leuchtend machen. Man stelle zu diesem Zwecke in einiger Entfernung von dem Auge eine Flamme auf, gegen deren blendende Wirkung sich der Beobachter durch einen Schirm schützt. Würde das beleuchtete Auge die Flamme fixiren, so würde auf der Netzhaut desselben nur ein kleines Flammenbildchen entstehen, dessen Strahlen auf demselben Wege, also auch zu der Flamme zurückkehren würden; sieht aber das Auge nach einer anderen Stelle, so entsteht auf der Netzhaut ein größerer, leuchtender Kreis durch die Flamme, wie durch eine Linse außerhalb der Bildweite, ein sogenannter Zerstreuungskreis, mittels dessen die Pupille roth leuchtend erscheint. Noch besser ist dieses künstliche Augenleuchten erreichbar, wenn nicht das directe Flammenlicht, sondern das von einem Spiegel reflectirte Licht in das Auge geworfen wird, während der Beobachter durch den Spiegel hindurch in dieses Auge sieht. Auf diesem einfachen Princip beruht der Augenspiegel. In dem ältesten Augenspiegel von Helmholtz besteht der Spiegel aus einer oder mehreren unbelegten Glasplatten, welche natürlich das Durchsehen direct gestatten; Ruete (1852) wandte zuerst einen belegten Hohlspiegel an, wodurch die Beleuchtung viel stärker wird, und brachte für das Durchsehen in dem Mittelpunkte eine Oeffnung an. Wenn man nun auch mittels einer solchen Vorrichtung die Netzhaut eines Menschen oder eines Thieres kräftig beleuchten kann, so gelingt es doch dem beobachtenden Anfänger nicht, sofort Einzelheiten auf derselben wahrzunehmen. Zu diesem Zwecke müßte der Beobachter im Stande sein, die von einer solchen Einzelheit ausgehenden Strahlen auf dem gelben Fleck seiner eigenen Netzhaut zu vereinigen, was nur dann leicht gelingt, wenn überhaupt schon ein Netzhautbild vorhanden ist, wenn sich also die Strahlen schon an einer anderen Stelle der Netzhaut vereinigen. Dies ist aber nicht der Fall, weil die aus einem Auge kommenden Strahlen durch die Augenmedien eine bestimmte Brechung erleiden, also auch einen bestimmten Vereinigungspunkt haben. Doch gelingt es nach fleißiger Uebung einem normalen Auge mittels einer besonderen, noch zu betrachtenden Fähigkeit des Auges, die man Accommodation nennt, die fremden Netzhautstrahlen auf der eigenen Netzhaut zu vereinigen. Ein ungeübter Beobachter oder ein solcher mit nicht normalen Augen muß sich durch Linsen unterstützen, wozu sowohl concave Linsen zur Erzeugung eines vergrößerten virtuellen Bildes, wie auch convexe Linsen zur Erzeugung eines reellen Bildes benutzt werden können. Der Augenspiegel von Helmholtz ist in Fig. 188 im Durchschnitt abgebildet. Das Licht der Flamme L fällt auf die Glasplatten a und wird von diesen in das Auge X reflectirt. Der Beobachter setzt das Instrument mit dem Becken B vor sein Auge, wodurch er sich gegen das Blenden durch die Flamme L schützt; er sieht durch die Concavlinsen c und c′, sowie durch die Platten a in das Auge X. In den zwei kreisförmigen Scheiben bb und dd, die um die Achse ff drehbar sind, sitzen mehrere Linsen, die nach Bedürfniß vor das beobachtende Auge gedreht oder auch herausgenommen werden können.

Auf dem Satze, daß Strahlen, welche durch eine brechende Kugel gegangen sind und

an der Hinterwand derselben ein Bild erzeugen, auf demselben Wege wieder zurückkehren, beruht der schon von Winterfeld (1795) und von Lommel (1874) neuerdings entdeckte Heiligenschein, den man auf einer thaubedeckten Wiese um den Schatten des eigenen Kopfes wahrnimmt. Derselbe ist jedoch nur bei tiefem Sonnenstande sichtbar. Jeder einzelne Thautropfen erzeugt auf seinem Grashalme ein Sonnenbild, dessen Strahlen ebenso rückwärts gehen und den ganzen Tropfen erleuchten, natürlich nur für ein Auge, das sich in der Richtung der Sonnenstrahlen befindet. Indessen ist dieser Nimbus auch auf einer trockenen Wiese, auf einem Getraide- oder Stoppelfeld, auf geackertem Boden, überhaupt auf jeder rauhen Fläche, aber viel schwächer, zu erblicken, rührt aber dann einfach davon her, daß die rauhen Theile um den Kopfschatten herum uns ihre beleuchteten Hälften, wie Vollmonde, zuwenden, während entferntere Theile sich wie Mondviertel oder Neumonde verhalten (Brockengespenst; Aureole um den Schatten eines Luftballons auf einer Wolke).

Fig. 188.

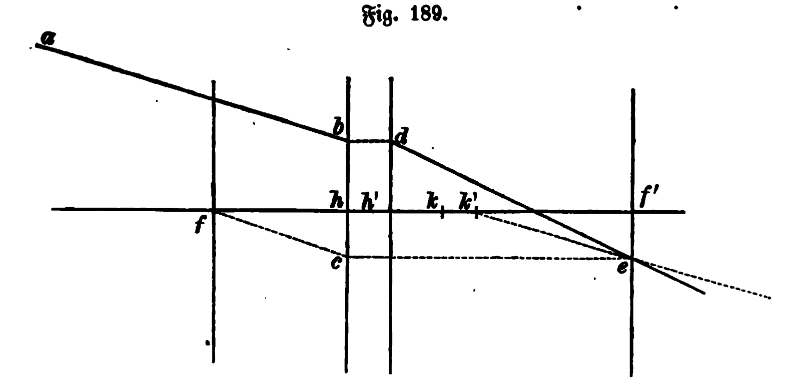


Das schematische Auge (Listing 1845). Um für jeden äußeren Punkt die Lage des Netzhautbildes leicht finden, und um das Auge überhaupt einer mathematisch-physikalischen Betrachtung unterziehen zu können, muß man von dem wirklichen Auge abstrahiren und sich mit einer Annäherung an dasselbe begnügen, die man schematisches Auge nennt. Denn in dem wirklichen Auge liegen 4 brechende Medien: die Hornhaut, die wässerige Feuchtigkeit, die Linse, der Glaskörper, hinter einander, deren Grenzflächen durchaus nicht kugelförmig sind, und deren Achsen nicht in eine Gerade fallen; außerdem ist die Linse ein aus unzähligen Lamellen zusammengesetzter Körper. Ein so verwickelt gebautes System entzieht sich der mathematischen Behandlung. Glücklicherweise ist aber die Abweichung von der Kugelgestalt und die Richtungsverschiedenheit der Achsen gering; außerdem läßt sich beweisen, daß für jedes centrirte System brechender Flächen ein System von nur 2 solcher Flächen gesetzt werden kann, welches ebenso große und ebenso gelegene Bilder entwirft wie jenes. Man findet daher annähernd richtige Gesetze für das Auge, wenn man die Scheiteltheile der brechenden Flächen für Kugelflächen nimmt, deren Mittelpunkte sämmtlich auf einer Geraden liegen, die von dem Scheitel der Hornhaut nach einem Punkte zwischen dem gelben und dem blinden Fleck hingeht und die man Augenachse nennt. Für ein System von 2 brechenden Flächen, also in 3 verschiedenen Medien sind für die Ableitung der

335

Bilder und Gesetze (nach Gauß „Dioptrische Untersuchungen" 1843) 2 Brennpunkte und der optische Mittelpunkt nicht ausreichend; es sind vielmehr 3 Paar Cardinalpunkte und durch dieselben senkrecht zur Augenachse gelegte Cardinalebenen erforderlich: 2 Brennpunkte, 2 Hauptpunkte und 2 Knotenpunkte, ebenso 2 Brennebenen, 2 Hauptebenen und 2 Knotenebenen. Der erste Brennpunkt ist dadurch bestimmt, daß jeder vor der Brechung durch ihn gehende Strahl nach der Brechung parallel zur Achse wird, während im zweiten Brennpunkte sich alle Strahlen vereinigen, die vor der Brechung parallel zur Achse waren. Die Hauptebenen sind dadurch bestimmt, daß das Bild eines in der ersten gelegenen Gegenstandes in der zweiten liegt und mit dem Gegenstande in Lage und Größe übereinstimmt; die Hauptpunkte sind die Schnittpunkte der Hauptebenen mit der Achse; der eine ist das Bild des anderen, d. h. die Strahlen, welche im ersten Mittel durch den ersten Hauptpunkt gehen, gehen nach der letzten Brechung durch den zweiten. Auch der zweite Knotenpunkt ist das Bild des ersten; sie sind dadurch bestimmt, daß ein Strahl, der im ersten Medium durch den ersten Knotenpunkt gerichtet ist, nach der Brechung in paralleler Richtung durch den zweiten Knotenpunkt geht. Nimmt man mit Listing den B.-E. der Luft = 1, der wässerigen und der Glasfeuchtigkeit = $^{103}/_{77}$, der Linse = $^{16}/_{11}$, die Krümmungsradien der Hornhaut = 8mm, der vorderen Linsenfläche = 10mm, der hinteren = 6mm, den Abstand der vorderen Hornhaut- und der vorderen Linsenfläche = 4mm, die Dicke der Linse = 4mm, Werthe, welche wohl auch Durchschnittsmaße der wirklichen Augen vorstellen, so ergeben sich für das schematische, ins Unendliche gerichtete Auge folgende Lagen der Cardinalpunkte: Abstand des ersten Brennpunktes vor der Hornhaut = 12,8mm, des zweiten Brennpunktes von der Hinterfläche der Linse = 14,6mm; Abstand des ersten Hauptpunktes von der Vorderfläche der Hornhaut = 2,17mm, des zweiten = 2,57mm; Abstand beider Hauptpunkte 0,4mm; Abstand des ersten Knotenpunktes von der hinteren Linsenfläche = 0,76mm, des zweiten = 0,36mm; Abstand beider Knotenpunkte = 0,4mm. In Fig. 186 sind diese Punkte der Reihe nach mit f, f′, h, h′, k, k′ bezeichnet. Mittels dieser Punkte und der dazu gehörigen Ebenen läßt sich die Lage und Größe eines Netzhautbildes sowohl berechnen als auch construiren. Den Gang eines Strahles ab (Fig. 189)

Fig. 189.



findet man auf folgende Weise: Man zieht von dem Schnitte b des Strahles mit der ersten Hauptebene eine Parallele zur Achse bis zur zweiten Hauptebene in d; ebenso durch f eine Parallele zum Strahle bis zur ersten Hauptebene in c und von hier parallel zur Achse bis zur zweiten Brennebene in e, dann ist de der gebrochene Strahl. Einfacher noch erhält man e durch die Knoten, indem man durch den zweiten Knoten k′ eine Parallele k′e zum Strahle bis zur zweiten Brennebene zieht. Da sowohl die beiden Hauptpunkte, wie auch die beiden Knotenpunkte einander sehr nahe liegen, so kann man jedes Paar in einen Punkt zusammenziehen und außerdem den 3 Medien ein einziges substituiren, dessen B.-E. = $^{103}/_{77}$ und dessen vordere Oberfläche einen Radius von 5,1248mm hat. Dieses Auge heißt Listings reducirtes Auge; in demselben findet man das Netzhautbild eines Lichtpunktes, indem man einfach von diesem durch den Knoten eine Gerade bis zur Netzhaut zieht, welche man die Richtungslinie des Sehens nennt; der gedachte Knoten ist also der Kreuzungspunkt der Richtungslinien; er liegt 0,4764mm vor der Hinterfläche der Linse. Benutzt man das schematische Auge, so muß man von dem Lichtpunkte eine Gerade nach dem ersten Knoten ziehen und zu dieser durch den zweiten Knoten eine Parallele. Diese zwei Linien geben den Weg des Lichtstrahles, des Richtungsstrahles, an, aber nur soweit, als die erste außerhalb des Auges und die letzte in dem Glaskörper liegt. Den Richtungs-

strahl, der die Stelle des deutlichen Sehens, die Netzhautgrube, trifft, nennt man die Gesichtslinie, auch wohl Sehachse; dieselbe fällt nicht mit der Augenachse zusammen. Der Winkel, den die Richtungslinien oder auch die Richtungsstrahlen der zwei äußersten Grenzpunkte eines Gegenstandes mit einander bilden, wird der Gesichtswinkel genannt. Aus der Größe und Entfernung eines Gegenstandes kann man seinen Gesichtswinkel berechnen und aus diesem und dem Abstande des Kreuzungspunktes der Richtungsstrahlen die Größe des Netzhautbildes. So entspricht einem Haar von 1/60''' Dicke in einer Entfernung von 28' gesehen ein Netzhautbild von 0,0 000 021'' Durchmesser und ein Gesichtswinkel von ca. 1 Secunde.

Nicht alle Gegenstände, die Lichtstrahlen ins Auge senden, erzeugen ein Bild auf der Netzhaut; es besteht vielmehr hier ebenso wie bei der einfachen Linse ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen der Gegenstandsweite, den Abständen der Cardinalpunkte und der Bildweite, so daß zu einer bestimmten Bildweite eine ganz bestimmte Gegenstandsweite gehört. Da nun die Entfernung der Netzhaut von der vorderen Augenfläche, also auch die Bildweite für jedes Auge eine bestimmte Größe hat, so könnten auch nur von Gegenständen in ganz bestimmter Entfernung scharfe Netzhautbilder entstehen, wenn nicht das Auge die Fähigkeit hätte, sich innerhalb gewisser Grenzen der Entfernung der Gegenstände anzupassen, eine Fähigkeit, die man das Accommodations- oder Adaptionsvermögen des Auges nennt.

Die Accommodation (Keppler 1611, Helmholtz 1855). Die Brillen. 336
Unter Accommodation versteht man die Fähigkeit des Auges, von Gegenständen in den verschiedensten Entfernungen innerhalb gewisser Grenzen deutliche Netzhautbilder hervorzurufen und dieselben dadurch deutlich sehen zu können. Doch ist hiermit nicht ausgesprochen, daß das Auge gleichzeitig verschieden entfernte Gegenstände deutlich zu sehen vermöge; vielmehr findet das directe Gegentheil statt.

Hält man hinter einen Schleier ein Buch, so erscheint das Gewebe verwaschen, wenn man die Buchstaben fixirt und umgekehrt; hält man senkrecht vor eine Fensterrippe eine Nadel, so erscheint beim genauen Betrachten des einen Gegenstandes der andere nur als unbestimmter Streifen. Sehr lehrreich ist Scheiners Versuch (1619): Man sehe durch zwei sehr nahe beisammen stehende Oeffnungen in einem Kartenblatte nach einer Nadel, die man senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Oeffnungen vor den hellen Hintergrund eines Fensters hält; fixirt man die Nadel selbst, so erscheint sie einfach; fixirt man dagegen einen näheren oder ferneren Punkt, so erscheint sie doppelt, aber undeutlich und verwaschen. Schließt man nun beim Fixiren eines näheren Punktes das linke Loch, so verschwindet das linke Bild und umgekehrt; beim Fixiren eines ferneren Punktes verschwindet mit dem Schließen des linken Loches das rechte Bild und umgekehrt. Dieser Versuch zeigt deutlich, daß beim Fixiren der Nadel die durch beide Löcher kommenden Strahlen sich auf der Netzhaut vereinigen, daß dagegen beim Fixiren eines näheren oder ferneren Punktes dies nicht stattfindet, und daß daher das Strahlenbündel jeder Oeffnung ein Bild erzeugt, das durch seine Undeutlichkeit eine unvollständige Vereinigung der Strahlen seines Bündels anzeigt, wie eine solche auch aus den zwei ersten der angeführten Versuche beim Nichtfixiren hervorgeht. Weil beim Fixiren eines näheren Punktes mit dem Verdecken des linken Loches auch das linke Nadelbild verschwindet, d. i. dasjenige, welches (wegen der umgekehrten Lage der Netzhautbilder) von dem rechten Netzhautbilde herrührt, so ergibt sich weiter, daß in diesem Falle die Strahlen sich schon gekreuzt haben, ehe sie auf die Netzhaut kamen, daß ihr Vereinigungspunkt also vor der Netzhaut liegt; und weil beim Fixiren eines ferneren Punktes mit dem Schließen des linken Loches das rechte Nadelbild verschwindet, d. i. dasjenige, welches von dem linken Netzhautbilde herrührt, so folgt, daß in diesem Falle die Strahlen der Nadel vor ihrer Vereinigung auf die Netzhaut fallen, daß also ihr Vereinigungspunkt hinter der Netzhaut liegt. Nehmen wir alle Versuche zusammen, so ist deutlich, daß die Strahlen eines nicht fixirten Punktes sich nicht auf, sondern vor oder hinter der Netzhaut vereinigen.

Nicht fixirte Gegenstände erscheinen hiernach undeutlich, weil das Netzhautbild von jedem Punkte derselben nicht ein Punkt, sondern wegen der Kreisform der Pupille ein Kreis, ein sogenannter Zerstreuungskreis ist, der davon herrührt, daß die Spitze des gebrochenen Strahlenkegels nicht auf, sondern vor oder hinter der Netzhaut liegt; und zwar vereinigen sich die Strahlen eines entfernteren Punktes, da dessen Zerstreuungskreis hinter der Kreuzung liegt, vor der Netzhaut, was auch schon aus der geringen Divergenz des durch die Pupille gehenden Strahlenkegels folgt; dagegen die Strahlen eines näheren, als des fixirten, Punktes vereinigen

sich, da ihr Zerstreuungskreis vor der Kreuzung der Strahlen entsteht, erst hinter der Netzhaut, was auch schon aus der größeren Divergenz der von einem nahen Punkte durch die Pupille gehenden Strahlen hervorgeht. Die Accommodation muß demnach darin bestehen, daß das Auge solche Veränderungen mit sich vornimmt, welche die Zerstreuungskreise in Bildpunkte verwandeln; dies könnte z. B. beim Uebergehen des Blickes zu einem entfernteren Punkte dadurch geschehen, daß die Strahlen desselben schwächer gebrochen würden und sich so nicht vor, sondern auf der Netzhaut vereinigten, und beim Uebergange zu näheren Punkten dadurch, daß die Strahlen stärker gebrochen würden und sich so statt hinter der Netzhaut, auf derselben vereinigen müßten. Aeußerlich nimmt man bei der Accommodation folgende Veränderungen am Auge wahr: Accommodirt sich das Auge für die Nähe, so verengert sich die Pupille, der Pupillenrand und die vordere Linsenfläche verschieben sich etwas nach vorn, und die vordere Linsenfläche nimmt eine stärkere Wölbung an. Helmholtz hat die letztere und wesentliche Veränderung daran erkannt, daß von den drei Sanson'schen Bildchen, die von einem hellen Lichte im Auge sichtbar sind, und welche von der Hornhaut, der Vorder- und Hinterfläche der Linse herrühren, das zweite beim Sehen in die Nähe sich verkleinert, was nur durch eine stärkere Wölbung der spiegelnden Fläche bewirkt werden kann. Demnach beruht die Accommodation darin, daß für nähere oder fernere Gegenstände die Linse sich stärker oder schwächer wölbt, wodurch die Strahlen mehr oder weniger gebrochen und dadurch auf der Netzhaut vereinigt werden. Wodurch diese Veränderungen stattfinden, ist noch nicht vollständig klar. Nach Cramer (1853) zieht sich beim Sehen in die Nähe die Iris zusammen und übt dadurch, vereinigt mit dem Ciliarmuskel einen Druck auf den Rand der Linse aus, wodurch der Rand nach hinten gebogen wird. Helmholtz (1855) hält diese Erklärung für unzureichend, weil hierdurch die Hinterfläche der Linse sich schwächer wölben müsse, während bei derselben doch ebenfalls eine schwache Verstärkung wahrnehmbar sei. Er nimmt daher an, daß die Linse im ruhenden, fernsehenden Zustande durch die an ihren Rand befestigte Zonula gedehnt werde; beim Sehen in die Nähe ziehe sich der Ciliarmuskel zusammen, biege dadurch die nach hinten ziehenden Falten der Zonula mehr nach vorn zum Linsenrande hin und vermindere so die Spannung der Zonula. Wenn aber der Zug der Zonula rings um den Rand der Linse herum nachlasse, müsse dieselbe vermöge ihrer schaligen Structur durch ihre eigene Elasticität sich stärker nach beiden Seiten wölben; durch den von Cramer erkannten Irisdruck würde die vordere Wölbung verstärkt, die hintere geschwächt (Mechanismus der Accommodation).

337 Die Entfernungen, für welche sich das menschliche Auge adaptiren kann, sind bei verschiedenen Individuen sehr verschieden. Den nächsten Punkt, für welchen man das Auge anpassen kann, nennt man den Nähepunkt, den entferntesten den Fernpunkt der Accommodation. Für normale Augen liegt der Nähepunkt 4 bis 5″ weit, der Fernpunkt im Unendlichen, da sie parallele Strahlen vereinigen können. Kurzsichtige oder myopische (μύω, zuschließen) Augen nennt man solche, welche sich nicht für die Ferne accommodiren können, deren Fernpunkt also in geringer Entfernung, oft nur wenige Zoll vom Auge liegt; meist können sich solche Augen für größere Nähen als normale Augen accommodiren, ihr Nähepunkt rückt ebenfalls näher. Weitsichtige oder presbyopische (πρέσβυς, Greis) Augen sind solche, welche sich nicht für die Nähe accommodiren können, deren Nähepunkt also in größerer Entfernung, oft mehrere Fuß vom Auge liegt. Kurzsichtige Augen brechen die Strahlen zu stark, vereinigen daher wohl die stark divergenten Strahlen naher Lichtpunkte auf der Netzhaut, aber die wenig aus einander gehenden Strahlen ferner

Punkte schon vor der Netzhaut; für das Fernsehen benutzen daher die Kurzsichtigen concave Brillen, welche bekanntlich die Divergenz der Strahlen vergrößern. Weitsichtige Augen brechen das Licht nicht stark genug, sind daher wohl ausreichend, die fast parallelen Strahlen entfernter Lichtpunkte auf der Netzhaut zu vereinigen, nicht aber die stark divergenten Strahlen naher Lichtpunkte; Weitsichtige benutzen daher für das Nahesehen convexe Brillen, welche bekanntlich die Divergenz vermindern. Worin die Abnormität dieser Augen liegt, ist noch nicht zweifellos aufgedeckt; die Kurzsichtigkeit hielt man früher für Folge einer zu starken, die Weitsichtigkeit für Folge einer zu schwachen Wölbung der Linse und der Hornhaut. Nach Donders (1864) sind indeß an beiden keine Krümmungsänderungen wahrzunehmen; vielmehr sind die Abweichungen Folgen verschiedener Krankheitszustände. Diese scheinen mit Entzündung der Aderhaut zu beginnen, welche allmälig organische Veränderungen dieser Haut und der Nachbargebilde, des Ciliarmuskels, der Zonula u. s. w. bewirken und dadurch eine Schwächung des Accommodationsvermögens, oft eine Verlängerung der Augenachse, eine Verlegung des Drehpunktes der Augen herbeiführen. Nach dieser Störung der Accommodation hat Donders die Augen eingetheilt. Augen, welche divergente und parallele Strahlen vereinigen können, nennt er emmetropisch (von ἔμμετρος, richtig); sie haben ihren Fernpunkt im Unendlichen. Augen, welche wohl divergente nicht aber parallele Strahlen zu vereinigen vermögen, die also ihren Fernpunkt vor sich, aber nicht im Unendlichen haben, werden brachymetropisch (βραχύς, kurz) oder myopisch genannt; sie haben oft längere Augenachsen und einen weiter hinten liegenden Augendrehpunkt als emmetropische Augen. Augen, die nicht nur parallele, sondern auch convergente Strahlen vereinigen, die also ihren Fernpunkt hinter sich haben, werden hypermetropisch genannt; sie haben oft kürzere Augenachsen und einen weiter vorn liegenden Drehpunkt als emmetropische Augen. Der Ausdruck presbyopisch bleibt auf die Augen beschränkt, die in höherem Alter durch Verhärtung der äußeren Linsenschichten die Accommodationsfähigkeit ganz verlieren. Emmetropische Augen haben eine Sehweite von 6″ bis Unendlich, brachymetropische z. B. von 3 bis 6″, hypermetropische z. B. von 12 bis — 12″; bei allen Arten gibt es eine Entfernung, in der kleine Gegenstände am deutlichsten erkannt werden; sie heißt die deutliche Sehweite, liegt immer etwas jenseits des Nähepunktes, bei emmetropischen Augen in 8 — 10″ oder circa 25 ^{cm}. — Zur Ermittelung der Sehweite dient das Optometer.

Die Ermittelung der Entfernung, in welcher mit oder ohne Brille gelesen werden kann, gibt kein sicheres Maß, weil die Buchstaben groß genug sind, um noch bei mangelhafter Accommodation erkannt zu werden. Young (1801) schlug den Scheiner'schen Versuch als Optometer vor; die Sehweite geht so weit, als ein Gegenstand durch 2 Oeffnungen als einfach erkannt wird. Ruetes Optometer (1852) besteht aus einer ausziehbaren dunkeln Röhre, durch welche der zu Untersuchende sieht, um am anderen Ende vorgehaltene Schriften zu lesen; da er die Schriften nicht kennt und die Entfernung nicht zu beurtheilen vermag, so wird er sich bei beabsichtigter Täuschung bald in Widersprüche verwickeln.

Die chromatische und sphärische Abweichung des Auges. Wie das Auge 338 vermöge der Accommodation sich vor den künstlichen Linsen dadurch auszeichnet, daß es die Bilder verschieden entfernter Gegenstände an gleicher Stelle zu erzeugen vermag, so ist es auch von zwei anderen Mängeln der gewöhnlichen Linsen, nämlich von der chromatischen und sphärischen Abweichung wenigstens insofern vollständig frei, als bei gewöhnlichem Sehen die Gegenstände weder farbige noch verwaschene Ränder zeigen. Die chromatische Abweichung fällt bei gewöhnlichem Sehen dadurch weg, daß die Dispersion des Wassers und wässeriger Flüssigkeiten sehr gering, drei mal kleiner als die des Glases ist, und daß bei der schwachen, gewöhnlichen Beleuchtung die außerordentlich schmalen farbigen Ränder außerdem noch sehr licht-

schwach sind und so verschwinden. Die sphärische Abweichung wird durch die Iris beseitigt, da dieselbe die Randstrahlen abhält.

Bei ungewöhnlicher oder sehr intensiver Beleuchtung treten die beiden Abweichungen indessen ziemlich merklich auf. Schon Fraunhofer (1814) beobachtete, daß er bei der Betrachtung eines Spectrums durch ein Fernrohr das Ocular dem Fadenkreuze näher schieben mußte, wenn er dasselbe im violetten Lichte so deutlich sehen wollte als im rothen. Am einfachsten bemerkt man die chromatische Abweichung mittels folgenden Versuches: Hinter eine mit violettem Glase bedeckte Oeffnung eines Schirmes stellt man ein Licht und beobachtet dann den farbigen Lichtpunkt in verschiedenen Entfernungen: ist das Auge in solcher Entfernung, daß es für die rothen Strahlen accommodirt ist, so sieht man einen rothen Lichtpunkt mit violettem Zerstreuungskreise, weil jetzt zwar die rothen Strahlen auf der Netzhaut vereinigt werden, die violetten aber nicht; ist das Auge für die violetten Strahlen adaptirt, so sieht man einen violetten Lichtpunkt von einem rothen Zerstreuungskreise umgeben; in der Mitte zwischen beiden Entfernungen, wo das Auge für beide Farben gleich wenig adaptirt ist, erscheint das Licht einfarbig. Weiße Flächen, welche weiter entfernt als der Accommodationspunkt liegen, zeigen bei aufmerksamer Beobachtung einen blauen Rand, dagegen einen rothgelben, wenn sie näher als jener Punkt liegen. Die sphärische Abweichung im gewöhnlichen Sinne ist nur wenig merklich; von dem Bau des Auges rühren folgende ähnliche Erscheinungen her, die man auch mit dem Namen Astigmatismus bezeichnet (α priv. und στιγμα Punkt). Ein heller Lichtpunkt erscheint als Stern, wenn das Auge nicht für ihn accommodirt ist, weil die Linse einen unregelmäßig strahligen Bau hat, wodurch sich auch die strahlige Gestalt der Sterne und ferner Laternen erklärt; aus demselben Grunde erscheinen helle Lichtlinien verdreifacht. Sieht man horizontale Linien scharf, so erscheinen an derselben Stelle befindliche verticale Linien undeutlich und umgekehrt, was auf Asymmetrie des Augapfels hinweist. Bei dem Eindringen sehr starken Lichtes in das Auge ist man geblendet, d. h. es entstehen plötzlich große, helle Zerstreuungskreise im Auge, innerhalb deren die Bilder anderer Gegenstände verschwinden; allmälig accommodirt sich das Auge d. h. die Pupille zieht sich zusammen, indem die Iris sich ausdehnt, wodurch eine geringere Menge von Lichtstrahlen durch die nun adaptirte Linse zu einem Bilde vereinigt wird. Gelangt man aus einem hellen in einen dunkleren Raum, so gelangt von den einzelnen Gegenständen zu wenig Licht durch die noch enge Pupille ins Auge; erst allmälig erweitert sich dieselbe, indem die Iris sich zusammenzieht; während dessen erholt sich die Netzhaut von der starken Einwirkung und wird für schwächere Eindrücke empfindlich, so daß die nun durch Vereinigung der größeren Strahlenbündel entstehenden Netzhautbilder empfunden werden. Die Selbstregulirung der Iris bei der Accommodation und je nach der Lichtmenge ist noch unerklärt. Thiere, wie die Katzen, deren Pupille eine schmale Spalte ist und daher große Unterschiede in der Größe zuläßt, können bei Tag und Nacht gut sehen, während die Eulen mit großer nicht verschließbarer Pupille bei Tage durch die Ueberfülle des Lichtes geblendet sind. Das Atropin, das Alkaloid der Belladonna erweitert die Pupille, die Lactuca verengert dieselbe.

339 **Die entoptischen Erscheinungen.** Werden Netzhautbilder empfunden, welche durch Gegenstände im Auge selbst hervorgebracht wurden, so nennt man diese Wahrnehmungen entoptische Erscheinungen. Gegenstände auf den vorderen Augentheilen nimmt man nur durch künstliche Beleuchtung wahr, indem man durch eine Schirmöffnung sieht, die sich im Brennpunkte einer großen, flachen Linse befindet und durch dieselbe das Licht einer Kerzenflamme erhält. Man sieht dann das Gesichtsfeld durch die Iris begrenzt, kann in dem Kreisrande derselben Zacken, Einschnitte u. dgl. erkennen, sieht die Flüssigkeiten auf der Hornhaut als helle Streifen oder helle Punkte, die beim Blinzeln verschwinden oder sich verändern, und bemerkt als feste von der Linse herrührende Erscheinungen dunkle und helle Flecken, helle Streifen, die eine Art Stern bilden, und dunkle radiale Linien, die von dem strahligen Bau der Linse herrühren mögen. Mit freiem Auge sieht man Gegenstände, die in dem Glaskörper schweben; Zellen, die sich in Schleimstoff umwandeln, erscheinen als isolirte Kreise, die bei lebhafter Augenbewegung von unten aufsteigen und sich dann langsam wieder senken; mit Körnern besetzte Fasern erscheinen als Perlschnüre, kleine Körnerhaufen als Gruppen von dunkeln Kreisen, Hautreste, die in der Glashaut schwimmen, zeigen sich als hellere Bänder von dunkeln Linien begrenzt. Alle diese Erscheinungen nennt man zusammen fliegende Mücken. Sie haben das Gemeinsame, daß sie beim Fixiren dem Fixationspunkte voraneilen und so dem Blicke weghuschen; sie sind nach Donders Reste des embryonalen Baues des Glaskörpers, dessen Zellen später zu Schleim zerfließen, während ein Theil ihrer Membranen und Kerne zurückbleibt. Von der Netzhaut selbst kann man (Purkinje 1819) die Schatten sehen, welche die in den obersten Schichten befindlichen Blutgefäße auf die Stäbchenschicht werfen, wenn man diese Schatten auf andere als die gewöhnlichen Stellen bringt und ihre Stellen stets verändert. Dies kann z. B. dadurch ge-

schehen, daß man eine helle Lichtflamme unterhalb oder seitlich vom Auge hin und her bewegt und dabei auf einen dunkeln Hintergrund sieht; bald erscheint dann der dunkle Hintergrund von einem mattweißlichen Schleier überzogen, auf dem sich dunkle Gefäßbäume abzeichnen; in der Mitte des Gesichtsfeldes entsteht eine weißliche Scheibe mit einem halbmondförmigen Schatten, nach H. Müller der Schatten der Netzhautgrube.

Die Lichtempfindung besteht in einer Reizung des Sehnerven. Wie jeder Reiz eines motorischen Nerven eine Zusammenziehung von Muskeln zur Folge hat, so erregt jeder Reiz eines sensiblen Nerven Empfindungen, und so erweckt auch jeder Reiz des Sehnerven eine Gesichtsempfindung. Am leichtesten wird der Sehnerv durch die Aetherwellen des Lichtes gereizt; doch bringt auch mechanische Einwirkung wie Schlag, Stoß und Druck gegen das Auge, heftige Augenbewegung, rasche Accommodation Lichtempfindungen hervor; ebenso entstehen solche durch Krankheitszustände des Auges und anderer Körpertheile, ja durch die Lebenswirkung des Auges selbst; besonders hervorragend sind die Lichtempfindungen durch den elektrischen Schlag, das Oeffnen und Schließen eines elektrischen Stromes, wie durch den elektrischen Strom selbst. (Gesetz der specifischen Sinnes-Energieen). **340**

Durch einen Schlag oder Stoß aufs Auge entsteht ein blitzähnlicher Schein durch das ganze Gesichtsfeld, der aber wie alle Lichtempfindungen nur subjectiver Natur ist und nicht, wie man manchmal glaubte, erhellend nach außen wirkt. Ein leichter Stoß auf eine Stelle des Augapfels erzeugt einen hellen Fleck, Druckbild oder Phosphen genannt, an der entgegengesetzten Stelle der Netzhaut; ein dauernder Druck ruft glänzende, wechselnde Figuren, sternförmig und rhombisch, hell und dunkel im Gesichtsfelde hervor. Bei schnellen Augenbewegungen und rascher Accommodation entstehen feurige Ringe, während beim Durchschneiden des Sehnerven ein ganzes Meer von Licht sich auszubreiten scheint. Bei Krankheiten können durch vermehrten Druck des Blutes oder der Augenflüssigkeiten, durch chemische Reizung bei Blutveränderung, durch Uebertragung eines Gehirnreizes auf den Sehnerven, ja selbst durch Fortpflanzung des Erregungszustandes eines Gehirntheiles bei irgend einer Vorstellung auf den Sehapparat, allerlei subjective Lichterscheinungen entstehen, wie ganz erleuchtete Gesichtsfelder, helle Flecken, Phantasmen in der Gestalt von Menschen und Thieren u. s. w. Das Auge selbst erzeugt durch sein inneres Leben im dunkeln Gesichtsfelde ein unregelmäßiges, schwaches Leuchten mit mannichfachen Figuren, wandelnde Nebelstreifen (Goethe) und sogar Phantasmen. Geht ein elektrischer Schlag durch den Kopf oder wird durch denselben ein el. Strom geöffnet oder geschlossen, so erscheinen Lichtblitze; der constant durchgehende Strom erzeugt ein weißlich violettes oder ein dunkleres rothgelbes Gesichtsfeld, je nachdem der positive oder der negative Strom den Sehnerven hinauf zum Gehirne geht.

Der Ort der Aufnahme der Lichtempfindung (der Lichtperception) ist die Stäbchenschicht der Netzhaut. **341**

Das normale Reizmittel des Sehnerven, die Wellenbewegung des Aethers, wirkt nicht direct auf den Sehnerven, da bekanntlich die Eintrittstelle desselben den blinden Fleck bildet, und wirkt auch nicht direct auf die Verzweigung desselben in der Netzhaut, da sonst in der Nähe der Eintrittstelle viele Nerven gleichzeitig getroffen würden und dadurch der Lichteindruck bedeutend erweitert werden müßte, und da es sonst unmöglich wäre, die Schatten der Netzhautgefäße zu sehen, welche theils in, theils noch unter den Nervenverzweigungen, in den sogenannten Körperschichten ihre Lage haben, und ihren Schatten doch nur auf eine tiefere Schicht werfen können. Tiefer liegt nur noch die Stäbchenschicht: also ist diese das Organ der Lichtperception.

Die Ausdehnung der Lichtempfindung hängt von der Größe des Netzhautbildes, also von dem Gesichtswinkel ab; die kleinste Lichtempfindung findet statt, wenn das Netzhautbild die Grundfläche eines einzigen Zapfens oder Stäbchens ganz oder theilweise erfüllt. Hieraus ergibt sich, daß bei gewöhnlichem Lichte der Gesichtswinkel des kleinsten, sichtbaren Gegenstandes $1/2$ Minute beträgt. **342**

Jeder Zapfen und jedes Stäbchen kann nur eine Lichtempfindung hervorbringen; füllt das Netzhautbild die Grundfläche eines Stäbchens, dessen Durchmesser bekanntlich $= 0{,}002^{mm}$, so ergibt eine einfache Rechnung mit Hilfe der Dimensionen von Listings schematischem Auge den zugehörigen Gesichtswinkel = ca. 30″. Ist aber das Netzhautbild kleiner als die Grundfläche eines Elementes der Stäbchenschicht, so wird sich seine Wirkung auf das ganze Element vertheilen und dadurch schwächen; es kann daher ein Gegen-

stand unter kleinerem Gesichtswinkel als 1/2 Min. nur dann sichtbar sein, wenn er stärker beleuchtet ist oder sich dunkel von hellem Grunde abhebt. So haben die Fixsterne einen Gesichtswinkel kleiner als 1″; ein glänzender Silberdraht auf dunkelm Grunde ist noch bei 2″ Gesichtswinkel sichtbar; Volkmann sah ein Haar auf dunkelm Hintergrunde unter 14″, ein Schüler Bärs sogar unter 1″.

343 Auch die Schärfe der Lichtempfindung d. i. die Fähigkeit, getrennte Gegenstände auch getrennt wahrzunehmen, hängt theilweise von der Größe der Netzhautelemente ab. Zwei helle Punkte können nur dann in allen Augenlagen als zwei erkannt werden, wenn der Abstand ihrer Bilder größer ist als die Breite eines Netzhautelementes. Außerdem ist die Unterscheidungsfähigkeit noch bedingt durch die Zahl der Elemente auf einem bestimmten Flächentheile, dann durch die Empfindlichkeit derselben, durch die psychische Vollkommenheit des Individuums und durch die physikalische Vollkommenheit des Auges.

Nach Hooke erscheinen zwei Sterne als ein Stern, wenn ihre Entfernung weniger als 30″ beträgt; ja unter Hunderten kann kaum Einer die beiden Sterne getrennt sehen, wenn sie einen Abstand von 60″ haben. Die Drähte eines Parallelgitters vor einem hellen Hintergrunde werden nur dann getrennt wahrgenommen, wenn die Abstände ihrer Achsen einem Gesichtswinkel von ca 1′ entsprechen. Die hellen Zwischenräume erscheinen hierbei nicht geradlinig, wie sie es in Wirklichkeit sind, sondern mit Anschwellungen und Einschnürungen versehen, weil die Enden der Netzhautelemente nicht rechteckige Streifen bilden, sondern bald breite, bald schmale Stellen darbieten, wie alle aus Vielecken zusammengesetzten Streifen.

344 Die Stärke der Lichtempfindung hängt außer von der Empfindlichkeit der Netzhaut und der Vollkommenheit des Auges von der Helligkeit des Lichtes und der Farbe desselben ab, d. i. von der lebendigen Kraft und von der Zahl der Aetherschwingungen. Was die Helligkeit anbelangt, so ist bei gewöhnlicher Helligkeit das Auge am empfindlichsten für Veränderungen um kleine Bruchtheile derselben; innerhalb der Grenzen gewöhnlicher Helligkeit, welche von dem Grade, wo Lesen, Schreiben und Arbeiten am bequemsten geschieht, bis zu der Helligkeit eines sonnenbeschienenen weißen Papiers zu rechnen ist, entsprechen gleichen Bruchtheilen der Helligkeit auch gleiche Zu- oder Abnahmen der Empfindungsstärke, woraus sich ergibt, daß die Empfindungsstärke dem Logarithmen der Helligkeit proportional ist (Fechners psychophysisches Gesetz). Hieraus folgt zunächst, daß bei geringer Helligkeit die Empfindungsstärke nahezu proportional ist der Lichtstärke selbst, daß aber bei großer Lichstärke geringe Zu- oder Abnahmen der Helligkeit keinen Einfluß auf die Empfindung haben. Indessen gilt Fechners Gesetz weder für allzu große Helligkeit, weil hier das Organ zu leiden beginnt, noch für allzu geringe, weil sich hier das Eigenlicht des Auges geltend macht; es gilt auch für mittlere Grade der Helligkeit nicht absolut genau. Hinsichtlich der Farbe ist der Eindruck von Gelb am hellsten und von Violett am dunkelsten. Doch ist auch hier die Helligkeit von Einfluß; bei heller Beleuchtung machen die rothen und gelben, bei schwacher die blauen und violetten Strahlen den stärkeren Eindruck auf das Auge.

Gemälde und Zeichnungen, welche vielerlei Abstufungen von Schatten und Licht haben, sind bei dem schwachen Kerzenlichte und dem hellen Tageslichte gleich deutlich. Sieht man durch verdunkelte Gläser nach Wolken, so bemerkt man nicht weniger Lichtstufen als mit freiem Auge. In guten stereoskopischen Photographien aber sieht man nach dem Himmel gerichtet zärtere Abstufungen als bei Tages- oder Lampenlicht. Der kleinste wahrnehmbare Bruchtheil der Helligkeit beträgt 1/60 bis 1/130; ist die Differenz geringer, so verschwindet sie für uns. Ein Schatten, den Mondlicht erzeugt, verschwindet bei hellem Lampenlichte, und dessen Schatten bei Sonnenlicht. Bilder einer Glasplatte verschwinden vor hellem Tageslichte, die Sterne sind bei Tage unsichtbar u. s. w., dagegen erscheinen bei Nacht helle Gegenstände im Verhältnisse zu ihrer Umgebung viel heller als bei Tage; die Maler beachten dies bei Mondscheinlandschaften. Nach Dobrowolsky (1872) ist der kleinste wahrnehmbare Bruchtheil der Helligkeit bei verschiedenen Farben verschieden, für Roth am größten (1/20), für Blau am kleinsten (1/200). Hiermit stimmen die Thatsachen, daß bei Halbdunkel Blau noch hell ist, während Roth schon verschwunden ist, daß die

Seitentheile der Retina rothblind sind, daß Rothblindheit am häufigsten vorkommt, daß mancher schwarze Staar mit Rothblindheit beginnt, und daß die zur Wahrnehmung von Roth nöthige Zeit, die Dauer der Reizung, dreimal so groß sein muß als beim Blau.

Die Irradiation (Keppler 1604) ist die Erscheinung, daß helle Flächen größer erscheinen als gleich große dunkle, daß daher nahe beisammen liegende helle Flächen für das Auge zusammenfließen und gerade dunkle Linien vor einem hellen Lichte wie durch einen weißen Einschnitt unterbrochen aussehen. Besonders stark treten diese Erscheinungen bei unvollkommener Accommodation auf. Sie rühren davon her, daß bei unvollkommener Accommodation große Zerstreuungskreise statt der Lichtpunkte entstehen, und daß auch bei vollkommener Accommodation sich kleine Zerstreuungskreise wegen der sphärischen und chromatischen Abweichung des Auges bilden. 345

Durch diese Zerstreuungskreise wird der Rand des Netzhautbildes weiter gerückt, als es nach der geometrischen Construction sein sollte. So greift der helle Rand einer weißen Fläche über den dunkeln Rand einer angrenzenden schwarzen Fläche über; das Umgekehrte findet aber ebenfalls statt. Es wird daher die Helligkeit der weißen Fläche schon vor ihrer Grenzlinie geschwächt, aber auch die Dunkelheit der schwarzen Fläche jenseits ihrer Grenzlinie aufgehoben und durch Hell ersetzt. Demnach würde jede helle Fläche durch allmälige Abstufungen in ihre dunkle Grenzfläche übergehen müssen, wenn nicht nach 344. bei großer Helligkeit schwache Differenzen derselben unmerklich blieben. Die geringe Lichtabnahme des hellen Randes wird dadurch unsichtbar, die Erweiterung desselben in die dunkle Fläche aber sichtbar sein, und zwar um so weiter, je näher die obere Grenze der gewöhnlichen Helligkeit an den Peripherieen der Zerstreuungskreise liegt, je heller also die weiße Fläche ist. Jenseits der Stelle, wo die Helligkeit ihr Maximum erreicht hat, verläuft sie allmälig in das Dunkel. Am deutlichsten sind diese verwaschenen Ränder bei unvollkommener Accommodation. — Irradiations-Versuche sind: Ein weißes Quadrat auf schwarzem Felde sieht größer aus als ein daneben liegendes schwarzes Quadrat auf weißem Felde; ebenso ein weißer Streifen auf schwarzem Grunde genau unter einem gleich breiten schwarzen Streifen auf weißem Grunde. Ein feiner Draht vor einer hellen Flamme verschwindet; die hellen Felder eines Schachbrettes fließen an den Ecken zusammen. Wenn man die Kante eines Lineals zwischen das Auge und ein helles Licht bringt, so zeigt die Kante vor dem Lichte einen Einschnitt. Helle Quadrate auf dunkelm Gunde erscheinen in ihrer Höhe, dunkle auf hellem Grunde in ihrer Breite vergrößert, weil die Zerstreuungskreise etwas höher als breit, demnach eigentlich Ellipsen sind. — Plateau erklärt die Irradiation durch eine Ausbreitung des Lichteindruckes auf die benachbarten Stellen der Netzhaut (1838). — Vermöge der Irradiation sieht die helle Mondsichel so aus, als ob sie einem größeren Kreise angehöre, als der neben ihr befindliche verfinsterte Theil oder als das vom Erdscheine erzeugte aschfarbige Licht des Mondes; aus demselben Grunde erscheinen Menschen in dunkeln Kleidern schlanker als in hellen u. s. w.

Die Dauer der Lichtempfindung. Wie ein Muskel, der von einem durch seinen Nerven gehenden elektrischen Schlage gereizt wird, $^1/_6$ Sec. lang im Zustande der Reizung,, der Contraction verbleibt, so hält auch die Lichtwirkung auf das Auge noch an, wenn das Licht verlöscht ist. Die Dauer der Nachwirkung ist um so größer, je stärker das Licht und je weniger ermüdet das Auge ist; die durch die Nachwirkung verursachte Empfindung nennt man das Nachbild oder Blendungsbild. Bei starkem Lichte nimmt das Nachbild rascher an Helle ab als bei schwachem, dauert aber doch länger; die Nachdauer des hellen Sonnenbildes kann sich auf einige Minuten erstrecken. Auch die Farbe ist von Einfluß auf die Dauer des Nachbildes. Wie von den 4 Farben Weiß, Gelb, Roth, Blau die erste am weitesten sichtbar ist und die letzte am wenigsten weit, so hat auch die erste die längste und die letzte die kürzeste Nachwirkung; nach Külp ist die Dauer des Nachbildes der 4 Farben bei mäßigem Lichte 0,1″; 0,09″; 0,08″; 0,066″. Vermöge der Nachwirkung bringen schnell wiederholte Lichteindrücke ähnlicher Art denselben Effect hervor wie eine continuirliche Beleuchtung. Wird hierbei eine Stelle der Netzhaut von periodisch veränderlichem Lichte getroffen, so ist die Lichtstärke gleich dem arithmetischen Mittel der einzelnen Lichtintensitäten. Die Nachwirkung hat Anwendung in den Wunderscheiben, Wundertrommeln und Farbenkreiseln. 346

Sieht man einen Augenblick nach der Sonne und schließt dann die Augen, so sieht man noch das Bild der Sonne, allmälig erblassend und farbenwechselnd. Schließt man das Auge nach längerem Fixiren einer dunkeln Zeichnung auf weißem Grunde, so sieht man zuerst schwach dieselbe Erscheinung, allmälig aber mit umgekehrter Lichtvertheilung. Die Wunderscheibe oder das Thaumatrop von Paris (1827) ist ein rechteckiges um eine Achse drehbares Täfelchen, auf dessen beide Seiten zusammengehörige Gegenstände gezeichnet sind, z. B. ein Käfig und ein Vogel; bei der Drehung scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Auf demselben Princip beruhen die stroboskopischen Scheiben von Stampfer (1832) und das ganz gleiche Phenakistoskop von Plateau (1832) (στροβέω, im Kreise herumdrehen; φέναξ, Lügner). Eine große Scheibe mit Randöffnungen und eine kleinere mit Zeichnungen von Gegenständen in verschiedenen Phasen einer Bewegung werden auf einer Achse gedreht, während man durch die Oeffnungen das Spiegelbild der kleinen Scheibe betrachtet; die Gegenstände scheinen dann die Bewegung auszuführen. Aehnlich ist das Dädaleum von Horner und die Zoetrope (ζωή, Leben; τροπή, Wendung) oder Wundertrommel. Das Continuirlichwerden eines oft wiederholten Lichteindruckes ist aus dem Leben bekannt. Eine glühende Kohle im Kreise geschwungen bildet einen feurigen Kreis, der Blitz erscheint linienförmig, obwohl er nur ein fortschreitender Funke ist, die Speichen eines rollenden Rades verschwinden. Jeder rasch sich bewegende leuchtende Gegenstand bildet eine leuchtende Linie oder Fläche, in welcher der einzelne Eindruck verschwindet. Der einzelne Eindruck eines rasch bewegten Gegenstandes tritt wieder auf, wenn derselbe nur für einen Moment beleuchtet wird, oder wenn man einzelne Eindrücke auf verschiedene Stellen der Netzhaut bringt; ein fliegender Vogel, ein rollendes Rad vom Blitze beleuchtet erscheinen ruhend. Hierauf beruht die optische Analyse der chemischen Harmonica, der Pfeifentöne, die Analyse der Wasserstrahlen u. s. w.; überhaupt hat die Nachwirkung des Lichtes zahlreiche wissenschaftliche Anwendungen: Müllers Wellenscheibe, Lissajous' Lichtfiguren, das Kaleidophon, die Bestimmung der Geschw. der El. von Wheatstone, der Farbenkreisel. Werden auf die Oberfläche eines Kreisels sectorförmig mehrere Farben gebracht, so mischt sich bei der Drehung der Eindruck derselben im Auge; daher dient der Farbenkreisel zum Studium der Mischfarben. Auch das Gesetz über die Mischung der Lichtintensitäten läßt sich am Farbenkreisel nachweisen, indem man auf verschieden vom Mittelpunkte entfernte Ringe Grau, dann Weiß und Schwarz in gleichem oder verschiedenem Verhältnisse anbringt und dann bei der Drehung gleiche oder verschiedene Nüancen von Grau erhält; wegen dieses Gesetzes erscheint der Regenbogenfarbenkreisel nicht vollkommen weiß. — Werden die zwei Scheiben des Phenakistoskops mit verschiedener Geschwindigkeit gedreht, so erscheinen die Figuren verzerrt; umgekehrt können verzerrt gezeichnete Figuren dann richtig erscheinen; Plateaus Anorthoskop (1836) (ἀνορθόω, herstellen).

347 **Die Nachbilder** (Fechner 1838). Die Reizung der Netzhaut durch Licht dauert länger als die Lichteinwirkung; diese Reizung vermindert an der getroffenen Netzhautstelle die Reizempfänglichkeit und schafft so einen Zustand, den man Ermüdung nennt; in dem Raume, den das Netzhautbild einnimmt, sind die von starkem Lichte getroffenen Stellen mehr ermüdet als die dunkleren Stellen; gelangt daher ein neuer Lichteindruck auf diesen Raum, so werden die ersteren Stellen denselben weniger lebhaft empfinden als die letzteren, die ersteren werden dunkler, die letzteren heller sein. Während also gleich nach dem ersten Lichteindrucke ein Nachbild entsteht, das dem Gegenstande in Hell und Dunkel gleich ist, muß bei dem zweiten Lichteindrucke ein neues Nachbild auftreten, in welchem Hell und Dunkel verwechselt erscheinen; das erstere wird positives, das letztere negatives Nachbild genannt. Läßt man auf ein positives, nur aus Weiß und Dunkel bestehendes Nachbild kein neues Licht treffen, sondern dasselbe ruhig weiter wirken, so verschwindet es allmälig, indem das Weiß durch grünliches Blau in Indigo, dann in Violett oder Rosa übergeht und mit grauem Orange zerinnt; man nennt diese Erscheinung das farbige Abklingen der Nachbilder. Farbige Objecte erscheinen im positiven Nachbilde mit derselben Farbe, im negativen mit der complementären Farbe.

Bei dem (für die Augen sehr gefährlichen) Studium der Nachbilder schließe man zuerst einige Zeit die Augen, um alle Reste früherer Bilder zu vertilgen. Um nun ein positives Nachbild zu erhalten, betrachte man etwa 1/3 Sec. lang eine helle Fensterfläche oder einen Kupferstich mit schwarzem Rahmen und schließe dann wieder die Augen, so wird man den Gegenstand mit derselben Lichtvertheilung sehen, in Einzelheiten sogar genauer als bei dem raschen directen Sehen. Um ein negatives Nachbild zu ertheilen,

fixire man das Fenster länger, bei mäßiger Beleuchtung 5—10 Sec.; dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stark und dauernd, oft 10 Min. lang. Beide Bilder fliehen vor dem Fixationspunkte her wie fliegende Mücken, bleiben aber beim Fixiren eines Gegenstandes stehen. Das negative Nachbild ist nur sichtbar, wenn neues Licht auf die Netzhaut wirkt; oft reicht hierzu das durch die geschlossenen Lider eindringende oder auch das Eigenlicht des Auges aus; wenn nicht, so richte man das offene Auge auf eine mäßig helle Wand oder lasse durch schwaches Blinzeln etwas Licht ein. In dem letzten Falle tritt manchmal ein Wechsel zwischen positiven und negativen Nachbildern ein, weil jeder Reiz auf ermüdete Nerven zwar schwächer ist, aber länger dauert, und weil daher der directe Reiz nach dem Schwinden des negativen Bildes wieder eintritt. Daß eine Lichtwirkung auf schon gereizte Netzhautstellen schwächer empfunden wird, zeigt folgender Versuch: Man betrachte ein auf grauem Grunde liegendes schwarzes Stück Papier und ziehe dasselbe dann weg, so sieht man ein hellgraues Nachbild auf dunkelgrauem Grunde; die Netzhautstelle, auf welcher das schwarze Bild sich befand, ist nicht ermüdet, sieht daher das Grau heller, als die ringsum liegenden schon länger durch das Grau beanspruchten Stellen; hierin liegt der Grund, daß für das positive Nachbild ein kurzes Fixiren nothwendig ist. — Auch bei farbigen Objecten ist dies zu beachten. Man legt ein farbiges Stück Papier auf grauen Grund, betrachtet es für einen Moment und zieht es dann weg, so sieht man auf derselben Stelle das positive Nachbild, über das sich bald ein rosenrother Schein ergießt, dann folgen gelblich graue Töne, in denen das positive Bild oft in ein sehr schwaches negatives übergeht. Durch längere Fixation erhält man negative complementäre Nachbilder, von Roth Blaugrün, von Gelb Blau u. s. w.; denn durch das längere Fixiren von Roth sind die rothen Nervenfasern (nach Young) stark ermüdet, die grünen und violetten nur sehr wenig; richtet man nun das Auge auf weißes Licht, so werden an der betreffenden Netzhautstelle die rothen Fasern nicht oder nur sehr wenig, die grünen und violetten aber stark gereizt, wodurch ein blaugrüner Eindruck entsteht. Grüne Brillen geben rothe Nachbilder, eine grüne Rose mit rothem Stengel erscheint im Nachbilde richtig gefärbt. — Ein grünes Object auf gelbem Grunde gibt ein rothgelbes, auf blauem Grunde ein violettes Nachbild; die hier möglichen mannichfaltigen Erscheinungen erklären sich sämmtlich leicht nach Youngs Theorie. Ein schwarzes Quadrat auf farbigem Grunde gibt ein helleres, gesättigteres Nachbild als der Grund selbst, weil die schwarze Stelle der Netzhaut nicht ermüdet ist für die Farbe, während der übrige Theil der Netzhaut dieselbe schwächer empfindet. Aus diesem Grunde verliert jede Farbe bei längerem Anschauen ihre Sättigung, ja erscheint sogar graulich, weil bei der Ermüdung der einen Nervenfaser die schwache Wirkung auf die zwei anderen zur Geltung kommt, welche sich mit der Wirkung auf die erste Faser zu Grau vereinigt. Hat das farbige Quadrat eine Farbe, die zu der des Grundes complementär ist, so erscheint im Nachbilde der Grund gesättigter, selbst wenn er homogen ist; denn ist z. B. das Quadrat blaugrün, so ermüdet es die grünen und violetten Fasern; dieselben werden dann von einem rothen Grunde nicht gereizt, und es entsteht im Nachbilde ein reineres Roth als das Spectralroth, weil dieses die unermüdeten grünen und violetten Fasern schwach mitreizt. — Das farbige Abklingen der Nachbilder beruht darauf, daß die Reizung der drei Fasern der Grundfarben verschiedenartig abnimmt, Roth anfänglich sehr stark und dann sehr schwach, Violett anfänglich stark und dann schwächer, Grün fast gleichmäßig; deßhalb herrscht bald Grünblau vor, aus welchem dann das Grün schwindet, um dem bleibenden Violett und Roth als Rosa Platz zu machen. Später mischt sich das Eigenlicht des Auges zu graulichem Orange ein, oder es entsteht bei neu eindringendem Lichte wegen der verschiedenartigen Ermüdung eine ganze Reihe von Phasen des negativen Nachbildes, welche am deutlichsten nach einem Fixiren der Sonne gesehen werden können. Auch Nachbilder farbiger Objecte klingen in solcher Weise ab, sowie rotirende flimmernde Scheiben mit schwarzen und weißen Sectoren, woraus sich ergibt, daß bei wechselnden Erregungen von Hell und Dunkel die größte Helligkeit der drei verschiedenen Grundfarben nicht zu gleicher Zeit stattfindet, sondern für Roth und Grün früher als für Violett. Hierauf beruhen die „flatternden Herzen“; rothe Herzen auf blauem Papier schwanken, wenn man die Papierscheibe hin- und herschiebt.

348 **Der Contrast** (Brücke 1850). Unter Contrast versteht man die Einwirkung von neben einander stehenden Farben und Helligkeiten auf einander. Chevreul bezeichnet die hierher gehörigen Erscheinungen genauer mit dem Namen des simultanen (gleichzeitigen) Contrastes und unterscheidet hiervon den successiven (nachfolgenden) Contrast, die Wirkung zweier Farben auf einander, die nach einander auf derselben Stelle der Netzhaut erscheinen. Brücke nennt die durch Contrast hervorge-

Sieht man einen Augenblick nach der Sonne und schließt dann die Augen, so sieht man noch das Bild der Sonne, allmälig erblassend und farbenwechselnd. Schließt man das Auge nach längerem Fixiren einer dunkeln Zeichnung auf weißem Grunde, so sieht man zuerst schwach dieselbe Erscheinung, allmälig aber mit umgekehrter Lichtvertheilung. Die Wunderscheibe oder das Thaumatrop von Paris (1827) ist ein rechteckiges um eine Achse drehbares Täfelchen, auf dessen beide Seiten zusammengehörige Gegenstände gezeichnet sind, z. B. ein Käfig und ein Vogel; bei der Drehung scheint der Vogel im Käfig zu sitzen. Auf demselben Princip beruhen die stroboskopischen Scheiben von Stampfer (1832) und das ganz gleiche Phenakistoskop von Plateau (1832) (στροβέω, im Kreise herumdrehen; φέναξ, Lügner). Eine große Scheibe mit Randöffnungen und eine kleinere mit Zeichnungen von Gegenständen in verschiedenen Phasen einer Bewegung werden auf einer Achse gedreht, während man durch die Oeffnungen das Spiegelbild der kleinen Scheibe betrachtet; die Gegenstände scheinen dann die Bewegung auszuführen. Aehnlich ist das Dädaleum von Horner und die Zoetrope (ζωή, Leben; τροπή, Wendung) oder Wundertrommel. Das Continuirlichwerden eines oft wiederholten Lichteindruckes ist aus dem Leben bekannt. Eine glühende Kohle im Kreise geschwungen bildet einen feurigen Kreis, der Blitz erscheint linienförmig, obwohl er nur ein fortschreitender Funke ist, die Speichen eines rollenden Rades verschwinden. Jeder rasch sich bewegende leuchtende Gegenstand bildet eine leuchtende Linie oder Fläche, in welcher der einzelne Eindruck verschwindet. Der einzelne Eindruck eines rasch bewegten Gegenstandes tritt wieder auf, wenn derselbe nur für einen Moment beleuchtet wird, oder wenn man einzelne Eindrücke auf verschiedene Stellen der Netzhaut bringt; ein fliegender Vogel, ein rollendes Rad vom Blitze beleuchtet erscheinen ruhend. Hierauf beruht die optische Analyse der chemischen Harmonica, der Pfeifentöne, die Analyse der Wasserstrahlen u. s. w.; überhaupt hat die Nachwirkung des Lichtes zahlreiche wissenschaftliche Anwendungen: Müllers Wellenscheibe, Lissajous' Lichtfiguren, das Kaleidophon, die Bestimmung der Geschw. der El. von Wheatstone, der Farbenkreisel. Werden auf die Oberfläche eines Kreisels sectorförmig mehrere Farben gebracht, so mischt sich bei der Drehung der Eindruck derselben im Auge; daher dient der Farbenkreisel zum Studium der Mischfarben. Auch das Gesetz über die Mischung der Lichtintensitäten läßt sich am Farbenkreisel nachweisen, indem man auf verschieden vom Mittelpunkte entfernte Ringe Grau, dann Weiß und Schwarz in gleichem oder verschiedenem Verhältnisse anbringt und dann bei der Drehung gleiche oder verschiedene Nüancen von Grau erhält; wegen dieses Gesetzes erscheint der Regenbogenfarbenkreisel nicht vollkommen weiß. — Werden die zwei Scheiben des Phenakistoskops mit verschiedener Geschwindigkeit gedreht, so erscheinen die Figuren verzerrt; umgekehrt können verzerrt gezeichnete Figuren dann richtig erscheinen; Plateaus Anorthoskop (1836) (ἀνορθόω, herstellen).

347 **Die Nachbilder** (Fechner 1838). Die Reizung der Netzhaut durch Licht dauert länger als die Lichteinwirkung; diese Reizung vermindert an der getroffenen Netzhautstelle die Reizempfänglichkeit und schafft so einen Zustand, den man Ermüdung nennt; in dem Raume, den das Netzhautbild einnimmt, sind die von starkem Lichte getroffenen Stellen mehr ermüdet als die dunkleren Stellen; gelangt daher ein neuer Lichteindruck auf diesen Raum, so werden die ersteren Stellen denselben weniger lebhaft empfinden als die letzteren, die ersteren werden dunkler, die letzteren heller sein. Während also gleich nach dem ersten Lichteindrucke ein Nachbild entsteht, das dem Gegenstande in Hell und Dunkel gleich ist, muß bei dem zweiten Lichteindrucke ein neues Nachbild auftreten, in welchem Hell und Dunkel verwechselt erscheinen; das erstere wird positives, das letztere negatives Nachbild genannt. Läßt man auf ein positives, nur aus Weiß und Dunkel bestehendes Nachbild kein neues Licht treffen, sondern dasselbe ruhig weiter wirken, so verschwindet es allmälig, indem das Weiß durch grünliches Blau in Indigo, dann in Violett oder Rosa übergeht und mit grauem Orange zerinnt; man nennt diese Erscheinung das farbige Abklingen der Nachbilder. Farbige Objecte erscheinen im positiven Nachbilde mit derselben Farbe, im negativen mit der complementären Farbe.

Bei dem (für die Augen sehr gefährlichen) Studium der Nachbilder schließe man zuerst einige Zeit die Augen, um alle Reste früherer Bilder zu vertilgen. Um nun ein positives Nachbild zu erhalten, betrachte man etwa 1/3 Sec. lang eine helle Fensterfläche oder einen Kupferstich mit schwarzem Rahmen und schließe dann wieder die Augen, so wird man den Gegenstand mit derselben Lichtvertheilung sehen, in Einzelheiten sogar genauer als bei dem raschen directen Sehen. Um ein negatives Nachbild zu ertheilen,

fixire man das Fenster länger, bei mäßiger Beleuchtung 5—10 Sec.; dann ist das positive Nachbild schwach und schwindet schnell, das negative dagegen stark und dauernd, oft 10 Min. lang. Beide Bilder fliehen vor dem Fixationspunkte her wie fliegende Mücken, bleiben aber beim Fixiren eines Gegenstandes stehen. Das negative Nachbild ist nur sichtbar, wenn neues Licht auf die Netzhaut wirkt; oft reicht hierzu das durch die geschlossenen Lider eindringende oder auch das Eigenlicht des Auges aus; wenn nicht, so richte man das offene Auge auf eine mäßig helle Wand oder lasse durch schwaches Blinzeln etwas Licht ein. In dem letzten Falle tritt manchmal ein Wechsel zwischen positiven und negativen Nachbildern ein, weil jeder Reiz auf ermüdete Nerven zwar schwächer ist, aber länger dauert, und weil daher der directe Reiz nach dem Schwinden des negativen Bildes wieder eintritt. Daß eine Lichtwirkung auf schon gereizte Netzhautstellen schwächer empfunden wird, zeigt folgender Versuch: Man betrachte ein auf grauem Grunde liegendes schwarzes Stück Papier und ziehe dasselbe dann weg, so sieht man ein hellgraues Nachbild auf dunkelgrauem Grunde; die Netzhautstelle, auf welcher das schwarze Bild sich befand, ist nicht ermüdet, sieht daher das Grau heller, als die ringsum liegenden schon länger durch das Grau beanspruchten Stellen; hierin liegt der Grund, daß für das positive Nachbild ein kurzes Fixiren nothwendig ist. — Auch bei farbigen Objecten ist dies zu beachten. Man legt ein farbiges Stück Papier auf grauen Grund, betrachtet es für einen Moment und zieht es dann weg, so sieht man auf derselben Stelle das positive Nachbild, über das sich bald ein rosenrother Schein ergießt, dann folgen gelblich graue Töne, in denen das positive Bild oft in ein sehr schwaches negatives übergeht. Durch längere Fixation erhält man negative complementäre Nachbilder, von Roth Blaugrün, von Gelb Blau u. s. w.; denn durch das längere Fixiren von Roth sind die rothen Nervenfasern (nach Young), stark ermüdet, die grünen und violetten nur sehr wenig; richtet man nun das Auge auf weißes Licht, so werden an der betreffenden Netzhautstelle die rothen Fasern nicht oder nur sehr wenig, die grünen und violetten aber stark gereizt, wodurch ein blaugrüner Eindruck entsteht. Grüne Brillen geben rothe Nachbilder, eine grüne Rose mit rothem Stengel erscheint im Nachbilde richtig gefärbt. — Ein grünes Object auf gelbem Grunde gibt ein rothgelbes, auf blauem Grunde ein violettes Nachbild; die hier möglichen mannichfaltigen Erscheinungen erklären sich sämmtlich leicht nach Youngs Theorie. Ein schwarzes Quadrat auf farbigem Grunde gibt ein helleres, gesättigteres Nachbild als der Grund selbst, weil die schwarze Stelle der Netzhaut nicht ermüdet ist für die Farbe, während der übrige Theil der Netzhaut dieselbe schwächer empfindet. Aus diesem Grunde verliert jede Farbe bei längerem Anschauen ihre Sättigung, ja erscheint sogar graulich, weil bei der Ermüdung der einen Nervenfaser die schwache Wirkung auf die zwei anderen zur Geltung kommt, welche sich mit der Wirkung auf die erste Faser zu Grau vereinigt. Hat das farbige Quadrat eine Farbe, die zu der des Grundes complementär ist, so erscheint im Nachbilde der Grund gesättigter, selbst wenn er homogen ist; denn ist z. B. das Quadrat blaugrün, so ermüdet es die grünen und violetten Fasern; dieselben werden dann von einem rothen Grunde nicht gereizt, und es entsteht im Nachbilde ein reineres Roth als das Spectralroth, weil dieses die unermüdeten grünen und violetten Fasern schwach mitreizt. — Das **farbige Abklingen der Nachbilder** beruht darauf, daß die Reizung der drei Fasern der Grundfarben verschiedenartig abnimmt, Roth anfänglich sehr stark und dann sehr schwach, Violett anfänglich stark und dann schwächer, Grün fast gleichmäßig; deßhalb herrscht bald Grünblau vor, aus welchem dann das Grün schwindet, um dem bleibenden Violett und Roth als Rosa Platz zu machen. Später mischt sich das Eigenlicht des Auges zu graulichem Orange ein, oder es entsteht bei neu eindringendem Lichte wegen der verschiedenartigen Ermüdung eine ganze Reihe von Phasen des negativen Nachbildes, welche am deutlichsten nach einem Fixiren der Sonne gesehen werden können. Auch Nachbilder farbiger Objecte klingen in solcher Weise ab, sowie rotirende flimmernde Scheiben mit schwarzen und weißen Sectoren, woraus sich ergibt, daß bei wechselnden Erregungen von Hell und Dunkel die größte Helligkeit der drei verschiedenen Grundfarben nicht zu gleicher Zeit stattfindet, sondern für Roth und Grün früher als für Violett. Hierauf beruhen die „**flatternden Herzen**"; rothe Herzen auf blauem Papier schwanken, wenn man die Papierscheibe hin- und herschiebt.

348 **Der Contrast** (Brücke 1850). Unter Contrast versteht man die Einwirkung von neben einander stehenden Farben und Helligkeiten auf einander. Chevreul bezeichnet die hierher gehörigen Erscheinungen genauer mit dem Namen des **simultanen** (gleichzeitigen) Contrastes und unterscheidet hiervon den **successiven** (nachfolgenden) Contrast, die Wirkung zweier Farben auf einander, die nach einander auf derselben Stelle der Netzhaut erscheinen. Brücke nennt die durch Contrast hervorge-

rufene Farbe die inducirte Farbe, und diejenige, welche die Ursache der inducirten ist, die inducirende. Die Erscheinungen des successiven Contrastes sind wie die negativen complementären Nachbilder Folgen der Ermüdung. Durch das Sehen einer inducirenden Farbe wird das Auge für dieselbe ermüdet; richtet sich dasselbe nun auf ein „reagirendes" Feld, so kann es in demselben jene Farbe nicht mehr völlig wahrnehmen; ist das Feld von gleicher Farbe, so ist die „resultirende" Farbe weißlich, ist es complementär, gesättigter, ist es gemischt, so enthält die resultirende Mischung die inducirende Farbe nicht mehr oder nur schwach. Der successive Contrast kommt auch in den meisten Fällen zur Wirkung, die man gewöhnlich zum simultanen Contrast rechnet, weil beim gewöhnlichen Sehen der Blick nicht fest auf einen Punkt gerichtet ist, sondern fortwährend wandert, um das Bild auf immer neue, unermüdete Stellen der Netzhaut zu bringen.

Legt man auf einen rothen Papierbogen einen weißen, grauen oder schwarzen Kreis, so erscheint derselbe blaugrün, weil wegen „des Wanderns des Blickes" die ganze Netzhaut für Roth ermüdet und daher nur die 2 anderen Grundbestandtheile des Weiß empfinden kann; der schwarze Kreis ist ebenso wenig wie der graue frei von weißem Lichte, und dieses weiße Licht ist es, was blaugrün erscheint. Auf gelbem Grunde erscheint sogar Schwarz und Grau reiner in dem complementären Blau, weil auf rein weißem Grunde sich diesem zuviel von dem nach Aubert röthlichen Tageslichte zumischt, wodurch ein weißer Kreis in violettem Contrast auftritt; ebenso erscheinen Grau und Schwarz auf blauem Grunde mehr gelb, während Weiß sich mehr dem Orange nähert. Ist das inducirende Feld groß und lichtstark und das „reagirende" klein, so kann selbst eine lebhafte Farbe desselben fast in die complementäre übergehen; ein kleines Stück mennigrothes Papier kann auf einer gegen den Himmel gehaltenen rothen Glasscheibe blaugrün erscheinen. Doch fehlt die Contrastwirkung auch nicht, wenn beide Felder gleich groß sind, nur ist die Wirkung dann gegenseitig. Ein gelber und ein rother Streifen, welche in einiger Entfernung von ganz gleichen Streifen neben einander liegen, sind so verändert, daß der gelbe grünlich und der rothe purpurn aussieht, während die entferenteren Streifen unverändert bleiben, da der bis zu ihnen wandernde Blick sich wieder erholt hat; bei breiteren Feldern tritt deßhalb die Contrastwirkung namentlich an den Grenzrändern auf. Ebenso erscheint mäßig Hell neben Dunkel heller, neben starker Helle dunkel, weil beim Wandern der Netzhaut auf das mäßig Helle im ersten Falle weniger müde, im letzteren Falle mehr ermüdete Stellen der Netzhaut gerichtet sind. Auch eine Farbe auf einer anderen verändert sich; ein mennigfarbiges Muster scheint auf Purpur mehr gelb, auf Grün mehr roth zu sein.

349 Der rein simultane Contrast, der im Ganzen ähnliche Erscheinungen wie der successiv-simultane bietet, ist nach Helmholtz nicht eine Veränderung der Empfindung, sondern der Beurtheilung. Jeder starke Eindruck wird nur im ersten Moment von uns richtig beurtheilt; er sinkt bald bis zur Neutralität herab; folgt dann der Eindruck der Neutralität, so macht dieselbe den entgegengesetzten Eindruck. Parallele Linien erscheinen uns convergirend, wenn divergente Linien durch sie gehen. Halten wir in raschem Fahren plötzlich still, so scheinen die Gegenstände auf uns zu zu laufen, die sich vorher von uns entfernten. Ebenso erscheint uns eine Farbe, die wir fest fixiren, allmälig immer weißlicher, und wirkliches Weiß daneben complementär. Dann sind Täuschungen in der Beurtheilung kleiner Unterschiede leichter möglich; daher tritt der simultane Contrast bei schwachen Unterschieden deutlicher auf. Bei zu starken Unterschieden kann sich die eine Farbe durch die Flüssigkeiten des Auges so zerstreuen, daß sie auch auf ein kleines reagirendes Feld übergeht; dasselbe kommt aber auch bei nicht starken Unterschieden vor, wenn die Fixation zu lange dauert, weil hierdurch alle Unterschiede verlöschen.

Die interessanteste der hierhergehörigen Erscheinungen bilden die farbigen Schatten; von den 2 Schatten, die ein von Tageslicht und Kerzenlicht beleuchteter Stift auf eine weiße Tafel wirft, erscheint der Schatten des Tageslichtes röthlichgelb und der des Kerzenlichtes blau, der Grund weiß. Daß dieses Blau nur eine Wirkung des Urtheils ist, zeigt folgender Versuch: Man blickt durch eine schwarze Röhre auf eine Stelle, die theils dem Grunde, theils dem Schatten des Kerzenlichtes angehört; dann erscheint der zweite Theil blau; rückt man nun die Röhre so, daß man nichts als Schatten des Kerzenlichtes sieht,

so erscheint das ganze Gesichtsfeld blau, und bleibt auch so, wenn die Kerze verlöscht; das Blau verschwindet erst, wenn man dann die Röhre vom Auge nimmt. Noch interessanter werden diese Versuche, wenn man das eine oder beide Lichter durch farbige Gläser gehen läßt und dadurch färbt. Immer erscheint bald der ganze Grund weiß und der eine Schatten complementär zu dem anderen. Auch wenn man durch ein farbiges Glas sieht, wird bald in unserem Urtheil alles Helle weiß, wenn das Glas nicht homogen ist, weil die Young'sche Faser der Hauptfarbe bald ermüdet, und dann ihren schwachen Reiz mit denen der beiden anderen Fasern zu Weiß vereinigt; dagegen durch ein homogenes z. B. rothes Glas gesehen, erscheint uns alles Helle roth, wozu noch das Eigenlicht der Netzhaut mitwirkt, weil vermöge desselben dann alles Dunkle grün aussieht. Weißes Papier bei gelbrothem Kerzenlichte erscheint uns weiß, dagegen durch die dunkle Röhre gesehen gelbroth. So erscheint uns jede farbige Fläche allmälig weißlich und daher jedes kleine Feld auf derselben, das einigermaßen Weiß enthält, complementär. Legt man auf einen großen farbigen Bogen ein kleines, graues Papierstückchen, so erscheint dies bald complementär; auf einem Quartblatte geschieht dies nicht; dagegen geschieht es auch auf diesem, wenn man dasselbe sammt dem Schnitzelchen mit einem durchscheinenden weißen Briefblatte bedeckt. Auf dem Briefblatte selbst aber hat ein Schnitzelchen die complementäre Farbe nicht; ja das untere Schnitzelchen verliert sogar seine complementäre Contrastfarbe, wenn man es mit dem oberen vergleichend beobachtet, oder wenn man seine Umrisse mit Strichen nachfährt. Dieser Versuch zeigt schlagend die Wirkung kleiner Unterschiede, beweist aber auch, daß diese Unterschiede nur in der Farbe bestehen dürfen. Beides ist auch noch aus folgendem Versuche ersichtlich: ein Farbenkreisel enthält 4 schmale rothe Sectoren, die in der Mitte von einem schwarzweißen Felde unterbrochen sind; beim Drehen erscheint die Scheibe schwach roth mit einem blaugrünen Ringe an der Stelle der Felder; dieser Ring verliert aber seine Farbe, wenn er mit Linien eingefaßt wird, oder wenn die rothen Sectoren zu groß sind. — Nach Burckhardt (1865) tritt der gleichzeitige Contrast nicht blos beim directen Sehen, sondern auch im Nachbilde auf; und zwar ist er im Nachbilde immer stärker als beim directen Sehen; er tritt im Nachbilde mit großer Bestimmtheit auf, wenn er im directen Bilde entweder ganz fehlt oder auf jede Weise geschwächt worden ist. Betrachtet man z. B. ein weißes Quadrat auf rothem Grunde, so sieht man im Nachbilde ein rothes Quadrat auf blaugrünem Grunde. Fixirt man eine Scheibe mit 2 farbigen Sectoren, während sie noch stille steht, und dreht man sie dann plötzlich, so sieht man bei dauerndem Fixiren das Nachbild in umgekehrter Färbung der Sectoren. — Sowohl die Farben der Nachbilder, als auch die Contrastfarben faßt man unter dem Namen subjective Farben zusammen.

Die Gesichtswahrnehmung. Jeden durch das offene Auge erhaltenen Eindruck auf die Netzhaut schreiben wir, durch tausendfältige Erfahrung belehrt, einer äußeren Lichtwirkung zu, wir projiciren die Netzhauteindrücke nach außen; da die gleichzeitigen Netzhauteindrücke neben einander liegen, so bilden auch die äußeren Projectionen ein flächenartiges Nebeneinander, das beim Sehen mit einem Auge wie die Netzhaut selbst, ungefähr die Form einer Kugelfläche bildet. Die Kugelfläche, die sich bei ruhigem geraden Sehen auf der Netzhaut eines Auges abbildet, nennt man das Sehfeld; dieses monoculare Sehfeld ist wohl zu unterscheiden von dem monocularen Blickfelde und dem monocularen Gesichtsfelde. Das monoculare Gesichtsfeld umfaßt den gesammten Raum, der mit Hilfe der Bewegungen eines Auges gesehen werden kann, und das monoculare Blickfeld den Raum, dessen sämmtliche Punkte durch ein bewegtes Auge fixirt werden können. Die Bewegungen eines Auges bestehen nur in Drehungen, da das Auge wegen vollständiger Ausfüllung der Augenhöhle sich nur sehr wenig in diese Höhle zurückziehen, und da es wegen der Muskeln und des Sehnerven nicht aus derselben treten kann. Die Drehungen geschehen um einen Punkt, welcher 13,6^{mm} hinter dem Scheitel der Hornhaut liegt. 350

Die Drehungen geschehen nach oben und unten, also um eine wagrechte von links nach rechts gehende Achse; diese mißt man durch den Erhebungswinkel; dann nach links und rechts, also um eine verticale Achse; diese werden durch den Seitenwendungswinkel gemessen; endlich um eine wagrechte von vorn nach hinten gehende Achse; man nennt dieselben Raddrehungen, weil sich hierbei die Iris wie ein Rad dreht. Eine Raddrehung findet nicht statt, wenn nur die erste oder nur die zweite Drehung vorgenommen wird; geschehen aber diese beiden Drehungen, so ist auch eine Raddrehung vorhanden. Die Raddrehung ist also eine Function der Erhebung und der Seitenwendung (Donders 1846).

Die Art dieser Function gibt Listings (1857) Raddrehungsgesetz: die Raddrehung ist so groß, als wäre der Augapfel um eine feste Achse gedreht worden, die zur ersten und zweiten Richtung der Fixationslinie (Blicklinie) senkrecht steht; hieraus ergibt sich eine Formel, welche die Größe der Raddrehung aus dem Erhebungs- und dem Seitenwendungswinkel zu berechnen erlaubt; sind beide z. B. 5°, so ist die Raddrehung nur 13′, sind beide 40°, so ist sie 15°; sie wächst mit beiden. Dieser Zusammenhang ist eine Folge des instinctiven Bestrebens, die leichteste Orientirung zu ermöglichen, und kann aus diesem Princip mathematisch abgeleitet und durch Beobachtung an Nachbildern experimentell bestätigt werden (Helmholtz 1863). Die Augenstellung ohne Drehung heißt Primärstellung, die Stellung nach einer Drehung um die erste oder zweite Achse Secundärstellung, die nach einer Drehung um eine beliebige aus den 3 Richtungen componirte Achse Tertiärstellung.

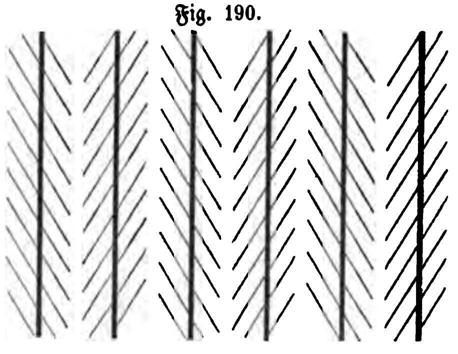
351 **Anordnung und Ausmessung im monocularen Gesichtsfelde** (Wundt 1862). Nach dem Gesetze der specifischen Sinnes-Energieen bringt jede Reizung der Netzhaut einen Lichteindruck hervor; so haben wir auch bei geschlossenen Augen durch das innere Leben des Auges eine Lichtwirkung auf alle Theile der Netzhaut und nehmen dieselbe wahr als ein dunkles, kugelförmiges Gesichtsfeld. Blindgeborene, später Operirte haben zuerst eine allgemeine Lichtempfindung, dann unterscheiden sie Helligkeiten, und später erst unterscheiden sie Gegenstände, Maße und Richtungen. So setzt sich auch unsere Gesichtswahrnehmung aus unendlich vielen Erfahrungen der jüngsten Kindeszeit zusammen; mit den hierdurch erworbenen Fähigkeiten verfahren wir später unbewußt im gewöhnlichen Sehen, wie ein Maler die in reiferem Alter, also bei vollem Bewußtsein, erlernten höheren Sehfähigkeiten später ebenfalls unbewußt immer verwendet. Nach den Gesetzen der Lichtbrechung entsteht das Bild eines äußeren Lichtpunktes an der Stelle der Netzhaut, wo ein von dem Punkte durch den Knoten gezogener Strahl die Netzhaut trifft; wir haben dies unzählige Mal erfahren, und versetzen daher später jeden Gegenstand unbewußt an die Stelle des dunkeln Gesichtsfeldes, wo eine vom Netzhautbilde durch den Knoten gezogene Grade eintrifft; hieraus folgt einfach, daß hoch liegende Netzhautbilder uns tiefliegende äußere Gegenstände, tiefliegende Netzhautbilder hoch liegende Gegenstände zur Wahrnehmung bringen, woraus sich auch erklärt, daß die umgekehrten Netzhautbilder uns die Gegenstände aufrecht wahrnehmen lassen. So entsteht durch Erfahrung die Wahrnehmung der Anordnung der Gegenstände. Wie aber die Empfindung der verschiedenen Stellen der Netzhaut zu Stande kommt, ob wir durch das Nebeneinanderliegen der verschiedenen Netzhautelemente sie auch als nebeneinanderliegend empfinden, oder ob die verschiedene Vertheilung der Stäbchen und Zapfen an verschiedenen Netzhautstellen eine verschiedene Empfindung dieser Stellen verursacht und uns dadurch die Ausdehnung des Gesichtsfeldes zum Bewußtsein bringt, oder ob die verschiedene Muskelanstrengung, welche nöthig ist, um die verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes mit dem gelben Fleck zu fixiren, uns die Vorstellung der verschiedenen Netzhautstellen hervorruft, ist noch nicht bestimmt erforscht. Bei den genauen Ausmessungen im Blickfelde spielt das Gefühl der Muskelanstrengungen jedenfalls eine Hauptrolle. Wir beurtheilen die Entfernung zweier Lichtpunkte durch das Gefühl der Muskelarbeit, welche nöthig ist, um das Bild des einen Punktes auf der Netzhautgrube durch das Bild des anderen auf derselben Stelle zu ersetzen; wir durchlaufen dann mit dem Blicke die Entfernung der beiden Punkte; aber auch wenn wir dies nicht thun, wenn der eine Punkt fest auf der Netzhautgrube und der andere auf einer anderen Stelle der Netzhaut abgebildet bleibt, so haben wir durch Erfahrung das Gefühl für die Muskelarbeit, die zum Durchlaufen der Entfernung nöthig wäre, und erhalten dadurch ein allerdings ungenaues Maß der Entfernung. Auf diese Weise setzt sich die Wahrnehmung der Größe der Gegenstände zusammen.

Im indirecten Sehen kann das Augenmaß nur sehr ungenau sein; nur solche gleiche Linien und Winkel werden gut als gleich erkannt, welche einander parallel sind und daher durch Augenbewegung rasch zum Decken mit ihren Nachbildern gebracht werden können.

Auch beim directen Sehen, d. i. beim Durchlaufen mit fixirendem Blicke hilft dieses Decken einer Linie mit dem Nachbilde einer parallelen, gleichen Linie die Genauigkeit des Augenmaßes verstärken, doch bringt man es nur durch Zufall dahin, zwei Entfernungen oder Linien einander absolut gleich zu machen; die Fehler betrugen bei Fechner durchschnittlich 1/60 und bei Volkmann 1/80—1/100 und zwar bei den verschiedensten Längen, wodurch sich auch hier das psychophysische Gesetz bestätigt. Die Vergleichung verticaler Linien ist ungenauer als die von horizontalen, und noch viel ungenauer ist die Vergleichung von Linien verschiedener Richtung, weil hier das Decken mit dem Nachbilde unmöglich und die Muskelarbeit nach verschiedenen Richtungen verschieden ist. Besonders auffallend ist der große Unterschied zwischen verticalen und horizontalen Linien; verticale erscheinen um 1/5—1/30 höher als gleich lange horizontale, ein Quadrat erscheint höher als breit. Auch in der Beurtheilung der Krümmung treten Täuschungen ein; gerade, wagrechte und senkrechte Linien erscheinen uns nur in der Primärstellung des Auges, d. i. in derjenigen Stellung, in welcher weder Erhebung, noch Wendung eine Raddrehung bewirkt, als gerade; in jeder anderen Lage, die ersteren bei höherer oder tieferer, die letzteren bei seitlicher Lage, erscheinen sie uns nach der Mittellage zu concav gekrümmt, was sich einfach daraus erklärt, daß das Auge beim Durchlaufen einer solchen Linie eine Raddrehung machen muß; doch findet diese Erscheinung auch im indirecten Sehen statt; zeichnet man umgekehrt convex nach einer Mittellinie in demselben Maße gekrümmte Linien, wie die geraden concav erscheinen, so sehen die convexen Linien beim Fixiren der Mittellinie gerade aus. Nur solche Linien, die durch den Blickpunkt des Auges in der Primärstellung, den sogenannten Hauptblickpunkt gehen, die also in Meridiane des Auges fallen, erscheinen auf kurze Strecken als gerade Linien; sie sind daher Richtlinien für das Auge, weil sie beim Durchlaufen mit dem Blicke gerade aussehen und in sich selbst verschieblich sind nach Listings Drehungsgesetz.

Aehnliche **optische Täuschungen** beruhen auf der bei allen Wahrnehmungen geltenden Regel, daß deutlich erkennbare Unterschiede größer erscheinen als undeutlich zu erkennende Unterschiede von gleicher objectiver Größe. Eine durch Striche getheilte Strecke sieht größer aus als eine in derselben Richtung befindliche Strecke von gleicher Länge; ein Quadrat, das durch Parallele zur Basis getheilt ist, erscheint höher als breit, ein anderes, das durch Senkrechte zur Basis getheilt ist, breiter als hoch; getheilte und ungetheilte rechte Winkel neben einander erscheinen ungleich, die ersteren stumpf, die letzteren spitz; ein leeres Zimmer sieht kleiner aus als ein möblirtes, Damenkleider mit Querstreifen lassen die Figur schlanker erscheinen, wir halten die Cylinderhüte für höher als breit; eine nach dem Augenmaße gefertigte Zeichnung einer unregelmäßigen Meeresküste enthält die wagrechten Linien in dem richtigen Verhältnisse, die verticalen aber doppelt so groß. Geht eine schiefe Linie hinter einem undurchsichtigen Streifen her, so halten wir ihre diesseitige Hälfte nicht für ihre Verlängerung, sondern eine etwas niedriger liegende Parallele. Parallele Linien, welche außerhalb mit Strichen versehen sind, die von der Mitte aus divergiren, erscheinen convergent, im entgegengesetzten Falle divergent (Hering). Sind verticale parallele Streifen von kurzen, schrägen, parallelen Strichen durchschnitten, so weichen sie immer in entgegengesetzter Richtung von der Verticalen ab, wie diese Striche (Fig. 190). Von zwei sectorförmigen congruenten Stücken eines Papierringes scheint uns immer dasjenige Stück als größer, das mit seinem größeren Bogen den kleineren des anderen berührt. Eine ähnliche optische Täuschung durch unser Urtheil ist die Ausfüllung des blinden Flecks. Wäre das Auge immer in Bewegung, so könnte man an die Ersetzung des mangelnden Eindruckes durch andere Netzhautstellen denken; da er aber auch bei fixirtem Blicke ausgefüllt ist, z. B. in unserer Fig. 187 mit dem schwarzen Papiergrunde, so muß angenommen werden, daß abgesehen vom binocularen Sehen unser Urtheil die Ausfüllung nach der Wahrscheinlichkeit vornimmt; eine Empfindung von Dunkelheit ist an dieser Stelle nicht möglich, weil ihr jede Lichtempfindungsfähigkeit abgeht.

Fig. 190.



Auch die Wahrnehmung der Bewegung gibt zu optischen Täuschungen Veranlassung. Wir nehmen eine Bewegung dadurch wahr, daß ein Netzhautbild seine Lage zu den übrigen ändert; dies kann aber auch dadurch geschehen, daß die Netzhaut mit einer Anzahl von Bildern sich bewegt, während andere ihre Lage behalten; daher sehen wir ruhende Gegen-

352

stände bewegt, wenn wir uns selbst unbewußt bewegen, oder wir glauben uns zu bewegen, während wir in Ruhe sind und sich etwas Fixirtes bewegt. Wenn wir uns selbst bewegen, so schreiten die Bilder naher Gegenstände rasch über die Netzhaut weg, die entfernteren dagegen langsam; wir halten daher die letzteren oft für ruhend, ja sogar in entgegengesetzter Bewegung begriffen. Fixiren wir rasch sich bewegende Gegenstände, so gewöhnt sich die ganze Muskulatur des Auges sogleich an diese Bewegung und setzt dieselbe auch noch fort, wenn man das Auge auf ruhende Gegenstände richtet; diese scheinen dann rasch in entgegengesetzter Richtung zu gehen. Hierdurch erklärt sich der Gesichtsschwindel; ist man in diesem begriffen, so sucht man instinctiv seine Stellung den scheinbar bewegten Gegenständen anzupassen, wodurch man das Gleichgewicht verliert. Auf Schiffen scheint dem Neuling die Cardani'sche Lampe zu schwanken; hat er sich aber daran gewöhnt, sich nach der Schwere zu orientiren, so erscheint ihm die Lampe ruhig, die Cajüte aber schwankend. — Wenn ein Auge seine Richtung oder Raddrehung ändert, so thut es auch das andere, selbst wenn das erste geschlossen ist; sieht man ins Unendliche, schließt dann ein Auge und fixirt mit dem anderen einen in der ursprünglichen Richtung desselben liegenden Gegenstand, so erscheint derselbe nach der Seite verschoben, weil auch das geschlossene Auge an der Fixation theilnimmt und dadurch seine Richtung ändert, was wiederum von dem offenen Auge mitgemacht wird. Hieraus hat Hering (1861) geschlossen, daß wir die Punkte des Netzhautbildes so nach außen projiciren, als ob dasselbe in einem Cyclopenauge auf der Nasenwurzel sich befände.

353 **Die Entfernung der Gegenstände vom Auge** (Wheatstone 1833). Wir nehmen die Entfernung der Gegenstände vor uns wahr 1) durch das Gefühl der nothwendigen Accommodationsanstrengung, 2) durch die Beobachtung mit bewegtem Kopf und Körper und 3) durch den gleichzeitigen Gebrauch der beiden Augen.

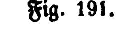
Außer diesen die Wahrnehmung der Tiefendimensionen ermöglichenden Hilfsmitteln gibt es noch andere, welche uns die Vorstellung derselben vermitteln; dahin gehört der Gesichtswinkel oder die Größe, in der uns bekannte Körper, Menschen, Hausthiere, Bäume, Häuser erscheinen; je kleiner dieselben aussehen, desto weiter sind sie entfernt. Hiermit hängt zusammen, daß Gegenstände von bekannter Entfernung, wenn wir sie wegen trüber Luft, wegen verwischten Umrissen u. s. w. für ferne halten, wie im Nebel schwimmende Gebäude, uns größer vorkommen. Kinder, denen die Beziehung zwischen Entfernung und Größe noch nicht geläufig ist, halten entfernte Menschen für Püppchen, besonders beim Sehen nach oben und unten, wo wir die Entfernungen leicht kleiner wahrnehmen als bei der gewöhnlichen wagrechten Sehrichtung. Ein weiteres Mittel, Entfernungen vorzustellen, liegt darin, daß Körper von bekannter Form von anderen verdeckt erscheinen und daher nothwendig hinter diesen liegen; auch die perspectivische Gestalt von Körpern, besonders von einfach und scharf begrenzten, befähigt uns, ihre Tiefendimensionen wahrzunehmen; während Kinder einen durch Linien perspectivisch gezeichneten Würfel, Kegel, Pyramide als flache, bedeutungslose Linienform sehen, hält es uns schwer, uns von der Vorstellung der Körperform loszumachen. Oft ist aber bei solchen Zeichnungen eine doppelte Täuschung möglich; sie kann sowohl einen hohlen, wie einen erhabenen Körper nach Belieben des Beschauers vorstellen; so können auch Matrizen als Patrizen erscheinen und umgekehrt. — Ein weiteres Moment zur Erkennung der Tiefendimensionen geben die Schlag- und Eigenschatten, besonders aber die Luftperspective; ein Gegenstand erscheint uns ferner, wenn seine Umrisse durch das trübe Luftmedium verwaschen, seine Farbe bläulich angehaucht erscheint; wir schätzen in Gebirgen die Entfernungen zu gering, weil die Luft dort reiner ist. Der Himmel erscheint uns als ein plattes Gewölbe, einerseits weil zwischen uns und dem Horizont zahlreiche Gegenstände und trübe Luft sich befinden, wodurch uns die Entfernung des Horizontes größer vorkommt als die des Zeniths, andererseits weil wir die offenbar platte Form des Wolkenhimmels auf den ungetrübten übertragen. So erscheinen uns Sonne und Mond im Horizont ferner und daher größer als in der Himmelshöhe.

Die Abschätzung der Entfernung eines Gegenstandes nach der Accommodationsanstrengung ist sehr ungenau; es ist nach Wundt wohl möglich, das Annähern eines Körpers hierdurch zu beobachten; schwieriger ist schon das Entfernen zu erkennen, und ganz unmöglich ist die Angabe der Distanz. Das genaueste Mittel zur Wahrnehmung der Entfernung ist die Vergleichung der zwei perspectivischen Bilder eines Gegenstandes von verschiedenen Standpunkten; dasselbe kann beim monocularen Sehen durch Bewegungen des Kopfes und des Körpers stattfinden, wird aber beim binocularen Sehen einfach dadurch bewerkstelligt, daß jedes Auge eine andere perspectivische Ansicht der Gegenstände, ein anderes Blick- und Sehfeld hat. Im ersten Falle wird das zweite

Bild in der Erinnerung mit dem ersteren verglichen, im zweiten Falle dagegen vergleicht man zwei gleichzeitig sichtbare Bilder; daher ist für Einäugige eine richtige Beurtheilung der Tiefen- und Entfernungsverhältnisse, also auch der Körperlichkeit viel schwieriger und unvollkommener als beim Sehen mit zwei Augen. Je weiter übrigens Gegenstände entfernt sind, desto ähnlicher werden ihre 2 Netzhautbilder; dies gibt uns dann wohl ein Mittel, ihre absolute Entfernung zu beurtheilen, macht uns aber die Wahrnehmung der Tiefendimensionen weniger möglich; sehr entfernte Gegenstände erscheinen uns flächenhaft.

Wenn wir an Gegenständen vorbeigehen, so haben wir natürlich durch unsere Bewegung eine directe Wahrnehmung ihrer Entfernung von unserem Ausgangspunkte und ihrer Tiefendimensionen. Wenn wir unsere Stellung gegen nahe Körper verändern, so erhalten wir durch die Verbindung unserer eigenen Bewegung mit der wahrgenommenen Veränderung des Körperbildes ebenfalls ein Urtheil über die Entfernung; ebenso bildet sich das Urtheil, wenn wir nur unseren Kopf bewegen, oder wenn wir die 2 Netzhautbilder vergleichen. In den letzten Fällen läßt sich die Erscheinung mit der geometrischen Bildconstruction eines Punktes durch Sehen mit 2 Augen vergleichen. Jedes Netzhautbild ruft in uns die Empfindung der Richtung hervor, in der sich ein Punkt befindet; die beiden Netzhautbilder wirken daher so, daß uns der Punkt in dem Schnitte der zwei verschiedenen Richtungen erscheint, in denen die beiden Augen den Punkt sehen. Diese Erklärung ist übrigens nur eine Veranschaulichung des Herganges, da das Auge die zwei Richtungen nicht als wirklich gezogene Linien sieht und daher auch ihren Schnittpunkt nicht fixiren kann; der Vorgang selbst ist die Vergleichung der 2 verschiedenen Netzhautbilder und ein daraus durch die Mittel der Erfahrung geschöpftes Urtheil über die Entfernung. Deßhalb sind auch hier leicht Täuschungen möglich; ja die genaue Schätzung von Entfernungen gehört zu den schwierigsten Augenwerken und geschieht selten ohne Fehler; die hierbei wirksame Empfindung wird wohl das Gefühl für den Grad der Convergenz sein, den unsere Blicklinien bei der Fixation des Gegenstandes annehmen müssen.

354 **Das Stereoskop** (Wheatstone 1833, Brewster 1843). Der sicherste Nachweis, daß das Abschätzen der Entfernungen und Tiefendimensionen, das körperliche Sehen, durch die Verbindung der beiden Netzhautbilder stattfindet, wird durch das Stereoskop geliefert. In seiner einfachsten Form besteht dasselbe aus den 2 Bildern eines Gegenstandes, wie derselbe von den beiden Augen wahrgenommen wird, wie z. B. Fig. 191 die Ansichten eines Würfels durch die beiden Augen darstellt. Bieten wir dem Gesichte gleichzeitig diese beiden Bilder dar, jedem Auge das zugehörige Bild, so erscheint uns der Gegenstand einfach und körperlich, stereoskopisch (στέρεος, körperlich); denn wir versetzen dann jeden Punkt in den Schnittpunkt der Blicklinien der 2 Augen, d. h. dahin, wo er am Gegenstande in Wirklichkeit ist. Die 2 Bilder müssen bei einem Versuche in die richtige Lage gegen die beiden Augen gebracht werden, d. i. diejenige, in welcher die Bilder eines unendlich entfernten Punktes beiden Augen in gleicher Richtung erscheinen. Dies läßt sich dadurch erreichen, daß man die beiden Bilder in einer Entfernung neben einander legt, die gleich dem Abstande der beiden Augenknoten ist, und sie dann mit parallel gerichteten Gesichtslinien betrachtet, d. h. also für die Entfernung der Bilder accommodirt. Da diese Augenstellung schwierig ist, und da man außerdem mit jedem Auge 2 Bilder sieht, so gelingt dieser einfachste Versuch nur nach vielfacher Uebung; etwas schneller erreicht man das Ziel, wenn man zwischen jedes Auge und das zugehörige Bild eine geschwärzte Röhre bringt, oder wenn man zwischen der Bildermitte und die Nase eine geschwärzte Wand stellt. Man kann auch dadurch ohne Apparat stereoskopisch sehen, daß man die Bilder verwechselt und dann mit dem rechten Auge nach dem linken Bilde und umgekehrt sieht, wodurch der Gegenstand an dem Kreuzungspunkte der Blicklinien stereoskopisch auftritt. Alle diese Mühen aber fallen weg bei dem Spiegelstereoskop von Wheatstone und dem Prismenstereoskop von Brewster. In dem ersteren sind 2 Spiegel unter 90° gegen einander und unter 45° gegen den Boden des Kastens aufgestellt, an dessen senkrechte Seitenwände die 2 Bilder gestellt werden. Man bringt den Nasenrücken an die Spiegelkante, so sieht man mit jedem Auge in einem Spiegel ein Bild. Das viel bekanntere Prismenstereoskop enthält für jedes Auge ein Prisma mit convexen Flächen, also Linsenhälften, die mit ihren brechenden Kanten gegen einander gewendet sind (a und b in Fig. 192). Mittels der Brechung durch Prismen werden die beiden Bilder u′ und u″ mehr der brechenden Kante genähert und erscheinen



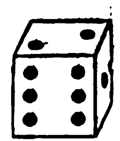
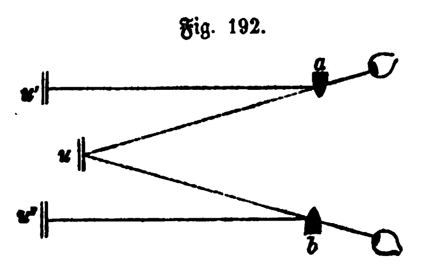


Fig. 191.

daher vereinigt in u, wo die Augen den Gegenstand körperlich erblicken. Dieses Stereoskop ist compendiöser als das von Wheatstone, läßt eine gleichmäßigere Beleuchtung zu und bringt wegen der Lupenform der Gläser eine Vergrößerung hervor; außerdem gestattet es die Anwendung der Glasphotographien und hat dadurch ein hohes Interesse für Kosmoramen und dgl. gewonnen. — Sind zwei Bilder absolut einander gleich, so erscheinen sie auch im Stereoskop nur als ein Bild, unkörperlich, flächenhaft. Sind sie dagegen in Kleinigkeiten der Stellung verschieden, so müssen die Augen Bewegungen machen, um die verschiedenen Bildstellen zu vereinigen, wodurch sich die Richtung der Sehstrahlen und dadurch der Schnittpunkt derselben verändert, bald vor, bald hinter die Bildfläche fällt; es tritt dann ein stereoskopisches Bild auf. Man benutzt dies zur Unterscheidung des ächten von falschem Papiergeld, zweier Auflagen desselben Druckwerkes u. dgl. (Dove 1859). Verwechselt man die Bilder eines Stereoskops, so erscheinen auch die Erhabenheiten und Vertiefungen, Hautrelief und Basrelief u. s. w. vertauscht; dasselbe wird durch Wheatstones Pseudoskop (1852) (ψεύδω, täuschen) bewirkt, in welchem die Strahlen eines Objectes durch Reflexion an den Hypotenusenflächen zweier rechtwinkeligen Prismen vertauscht werden. — Um auch ferne Gegenstände nicht flächenhaft, sondern körperlich sehen zu können, dient das Telestereoskop (Helmholtz 1857); es ist ein Spiegelstereoskop, welches statt der Bilder noch zwei den inneren Spiegeln parallele nach dem Horizont gewendete Spiegel enthält; hierdurch entstehen zwei mehr von einander entfernte Bilder des Horizontes, die durch die inneren Spiegel in beiden Augen stereoskopisch vereinigt werden.

Fig. 192.



355 **Das binoculare Sehen** (Hering 1864, Helmholtz 1864). Das Sehen mit zwei Augen hat vor dem monocularen Sehen den Vorzug, daß die Unrichtigkeiten eines Auges durch das andere corrigirt werden, daß die Gegenstände nicht flächenhaft, sondern körperlich erscheinen, und daß eine genauere Schätzung der Größe und Entfernung der Körper möglich wird. Wir sehen trotz der zwei Augenbilder nur einfach, weil überhaupt jede Sinneswahrnehmung, die aus mehreren Empfindungen zusammengesetzt ist, aber von einer einheitlichen äußeren Ursache herrührt, durch allmälige Erlernung sich in Uebereinstimmung mit der Ursache setzt, also einheitlich wird. Indessen sehen wir trotz dieses einheitlichen Eindruckes einen großen Theil des Gesichtsfeldes doppelt, d. h. einen und denselben Gegenstand durch jedes Auge an einer anderen Stelle, wie man leicht durch abwechselndes Betrachten eines Gegenstandes auf einem und demselben Hintergrunde bald mit dem einen, bald mit dem anderen Auge erfahren kann. Es ergibt sich dann, daß wir alle Punkte doppelt sehen, die in den Sehfeldern beider Augen eine verschiedene Lage zum Blickpunkte haben, dagegen diejenigen einfach d. h. im gemeinschaftlichen Gesichtsfelde sich deckend, die eine gleiche Lage zum Blickpunkte haben, deren Netzhautbilder also gegen den gelben Fleck gleich liegen. Zu diesen sich deckenden oder auch identischen Punkten gehören die beiden Blickpunkte, die Punkte der beiden Netzhauthorizonte, welche gleichweit vom Bildpunkte abstehen, die Punkte der scheinbar verticalen Meridiane, die gleichweit vom Netzhauthorizonte entfernt sind, und alle diejenigen Punkte, welche gleiche und gleich gerichtete Abstände von diesen Linien besitzen. Diese Punkte bilden sich auf solchen Netzhautstellen ab, die in beiden Augen eine identische Lage gegen den gelben Fleck haben, und die man deßhalb identische Punkte der beiden Netzhäute nennt. Den Inbegriff aller Punkte des äußeren Raumes, welche sich auf identischen Netzhautstellen abbilden und daher einfach gesehen werden, nennt man den Horopter. Derselbe ist im Allgemeinen eine Curve doppelter Krümmung, welche als Schnittlinie zweier Flächen zweiten Grades angesehen werden kann.

Betrachtet man mit einem Auge einen Gegenstand auf einem Hintergrunde, so erscheint er wie ein Schemen auf dessen Fläche, und eine Beurtheilung der Entfernung

wird unmöglich; öffnet man aber das andere Auge, so springt der Körper plötzlich vom Hintergrunde ab. — Hält man zwei Finger hinter einander, so sieht man beim Fixiren des einen den anderen doppelt. — Fixirt man einen Lampencylinder auf einem gestickten Vorhange als Hintergrund, so rückt die Stickerei beim Schließen des rechten Auges nach links, beim Schließen des linken Auges nach rechts. Fixirt man aber die Stickerei, so rückt der Cylinder beim Schließen des rechten Auges nach rechts und beim Schließen des linken Auges nach links; da nun beim Schließen eines Auges das Bild des anderen offenbar an derselben Stelle der Netzhaut dieses Auges steht wie beim Oeffnen beider Augen, so folgt, daß beim Fixiren des Cylinders zwei verschieden gelegene Bilder der Stickerei, beim Fixiren der Stickerei zwei verschiedene Bilder des Cylinders entstehen, daß man also trotz des Einfachsehens mit beiden Augen doppelt sieht; und zwar sind es die nicht fixirten Gegenstände, während der fixirte einfach gesehen wird. Durch ähnliche Versuche ergeben sich die übrigen obigen Sätze. Absolut genau gelten dieselben nicht wegen der nicht genau sphärischen Gestalt des Auges und wegen der schon früher besprochenen Abweichungen desselben; namentlich sind die verticalen Meridiane nicht genau identisch, sondern die identischen Linien weichen etwas von ihnen ab und zwar oben nach außen und unten nach innen, so daß also die physiologische Höhenachse des Auges etwas zu der geometrischen geneigt ist. — Die Construction und Berechnung des Horopters beruht darauf, daß die Richtungslinien, die von zwei identischen Netzhautpunkten ausgehen, sich in einem Horopterpunkte schneiden. Hieraus ergeben sich die mathematischen Ableitungen der Horoptergleichungen; die von Helmholtz geht davon aus, daß jeder Netzhautpunkt als Schnitt eines Meridians und eines Parallelkreises, dessen Pol der gelbe Fleck ist, aufgefaßt werden kann; der andere von Helmholtz und von Hering eingeschlagene Weg betrachtet einen Netzhautpunkt als bestimmt durch seinen Erhebungswinkel und seinen Seitenwendungswinkel. Legt man nun durch Punkte von gleichen Erhebungswinkeln in beiden Augen Ebenen und sucht die Durchschnittslinie dieser Ebenen, so ist der Inbegriff aller dieser Schnittlinien der „Horizontalhoropter"; analog ergibt sich der „Verticalhoropter", dessen Schnitt mit dem Horizontalhoropter dann den Horopter für den Punkt, von dessen Winkeln man ausgegangen ist, darstellt; so erhält man den „Punkthoropter" als Schnitt zweier „Linienhoropter". Von diesen Linienhoroptern ist noch von Bedeutung der „Meridianhoropter", der bei der ersten Methode auftritt; dort legt man nämlich die Hilfsebenen durch identische Meridiane und den Knotenpunkt; der Inbegriff der Schnittlinien je zweier dieser Ebenen ist der Meridianhoropter oder die Normalfläche, welche die Eigenschaft hat, daß zwar nicht alle in ihr liegenden Punkte, aber wohl alle in ihr liegenden geraden Linien einfach erscheinen. Beide Methoden der Horopterbestimmungen sind Probleme der höheren Mathematik. In einigen Fällen reicht einfache geometrische Betrachtung aus; z. B. in der Primärstellung und bei den Secundärstellungen mit parallelen und wagrecht gerichteten Sehachsen ist der Horopter eine der wagrechten Visirebene parallele Ebene, welche mit dem Fußboden zusammenfällt, was für unser gewöhnliches Sehen und Gehen von großer Wichtigkeit ist; da nämlich die physiologischen Achsen sich etwa 5′ unterhalb der Augen schneiden, und da in diesem Falle der Horopter durch diesen Schnittpunkt geht, so fällt er in den Fußboden. Der Meridianhoropter ist für convergente Secundärstellungen eine auf der Visirebene im Blickpunkte senkrechte Ebene, woraus sich ergibt, daß jede gerade Linie einfach erscheint, sobald ein Punkt derselben in Secundärstellungen fixirt wird; in Tertiärstellungen erscheinen sie durch Verbindung der Doppelbilder gekrümmt, wie z. B. die Strahlen eines Drahtsternes, dessen Mittelpunkt man in Tertiärstellungen fixirt. — Da der Horopter für jede Augenstellung nur eine beschränkte Anzahl von Punkten umfaßt, so ist die Zahl der Punkte des Gesichtsfeldes, die doppelt gesehen werden, sehr groß; außerdem fallen wegen der Doppelbilder auf identische Netzhautstellen Bilder verschiedener Objectpunkte; da nun die Eindrücke identischer Netzhautstellen sich zu vereinigen scheinen, so müßte dadurch eine Unreinheit der Bilder entstehen, wenn nicht für eine Verschmelzung der Doppelbilder gesorgt wäre. Diese wird dadurch befördert, daß der einheitliche Eindruck der zwei Horopterbilder, zu denen gewöhnlich die auf dem gelben Fleck befindlichen Bilder gehören, alle Nebeneindrücke bedeutend überwiegt; denn diese Bilder sind die genauesten, weil sie dem Fixationspunkte angehören, sie machen einen stärkeren Eindruck, weil stets zwei Horopterpunkte zusammen wirken, und für sie ist das Auge mehr accommodirt, als für die Doppelbilderpunkte, die besonders in größeren Entfernungen vom gelben Fleck sehr ungenau sind und daher von der Aufmerksamkeit ausgeschlossen bleiben; überhaupt sind die physischen Einflüsse, die uns die Vorstellung von der Einheit des Objectes aufzwingen, Veranlassung für uns, die Doppelbilder zu vernachlässigen; und wollen wir dieselben einmal beachten, so lassen wir uns durch die leichte Beweglichkeit der Augen sofort zur Fixation verleiten, wodurch die Verdoppelung schwindet.

Wettstreit der Sehfelder (Haldat 1806, Dove 1841). Sind die Sehfelder 356

der beiden Augen mit verschiedenartigen Formen, Farben, Helligkeiten erfüllt, die keine Verschmelzung zu einer Einheit zulassen, so sieht man oft beide Bilder gleichzeitig und einander superponirt; oft herrscht in einzelnen Theilen des Gesichtsfeldes das eine Bild vor, in anderen mehr das andere, und wohl kommt es auch vor, daß an einer Stelle des Gesichtsfeldes ein Bild durch das andere verdrängt wird. Man bezeichnet diese Erscheinung als Wettstreit der Sehfelder.

Zwei monoculare Bilder können nur dann zu einem binocularen verschmelzen, wenn sie in Lage, Gestalt, Größe und Farbe übereinstimmen oder nur geringe Unterschiede darbieten, weil nur dann in uns das Bewußtsein von der Einheit der Ursache der Bilder erweckt wird. Ein horizontaler und ein verticaler dunkler Streifen im binocularen Sehen über einander gebracht, decken sich trotz völliger Congruenz in Form und Farbe nicht; sie bilden ein schwarzes Kreuz, das an der quadratischen Deckstelle dunkel, an den Seiten derselben aber etwas hell erscheint; es machen sich also die Contouren beider Bilder sichtbar und verdrängen den Eindruck des leeren Feldes. Dies weist darauf hin, daß wir zur Wahrnehmung der Formen den Blick über die Contouren laufen lassen, daß also bei dem Wettstreite die Aufmerksamkeit ins Spiel kommt. Noch deutlicher tritt dies durch Mischung von Linienbildern verschiedener Richtung hervor; man kann bald das eine, bald das andere Muster im binocularen Sehen wahrnehmen, je nachdem man die Aufmerksamkeit richtet, woraus Helmholtz abermals schließt, daß die Inhalte der zwei Sehfelder nicht durch organische Einrichtungen verschmolzen werden, sondern daß die Verschmelzung der Sehfelder in ein Bild ein psychischer Act ist. Helmholtz und Andere nehmen auch niemals Mischfarben wahr, wenn beiden Sehfeldern verschiedene Farben geboten werden, und erklären manchmal auftretende Farbenänderungen als Wirkungen des binocularen Contrastes oder als Täuschung, hervorgebracht durch Superposition verschiedener Farben. Dove, Regnault, Brücke u. A. dagegen finden, daß zwei verschiedene Farben den beiden Augen dargeboten sich im binocularen Sehfelde nach den Regeln der Farbenmischung vereinigen, daß z. B. complementäre Farben Weiß geben, wenn das Auge des gewohnten Herumschweifens, wodurch der Wettstreit entstehe, sich entledige und die zwei Farben fixire. Brücke brachte (1853) vor das eine Auge ein hochgelbes, vor das andere ein blaues Glas und fixirte mit beiden Augen einen Gegenstand; er sah denselben dann blaugrau wie durch eine Londonsmoke-Brille. Entscheidend in diesem Streite über den Streit wird von Vielen Doves Versuch gehalten, nach welchem zwei verschieden gefärbte Bilder im Stereoskop die Mischfarbe annehmen, bei complementären Farben also weiß aussehen. Es wird hieraus geschlossen, daß in den Augen die beiden Farben wirklich gemischt würden, daß die Verschmelzung der Augenbilder auf identischen Netzhautstellen ein organischer, nicht ein psychischer Vorgang, also angeboren und nicht angelernt sei (Nativistische Theorie im Gegensatze zur empiristischen). Diese organische Verschmelzung soll nach Einigen von der Kreuzung der Sehnerven (Chiasma nervorum opticorum) herrühren, an welcher Stelle je eine Hälfte des einen Nervenstammes mit einer Hälfte des anderen zu neuen Nervenstämmen zusammentrete. Helmholtz führt als Hauptgrund gegen diese Auffassung der Identität den Versuch Wheatstones an, nach welchem umgekehrt zur Stereoskopie, correspondirende Punkte auf zwei identischen Netzhautstellen auch getrennt empfunden werden können. Wir haben uns oben im Ganzen an Helmholtzs Erklärungen angeschlossen, bekennen aber offen, uns nicht für eine der beiden Theorien ausschließlich der anderen entscheiden zu können.

Nach Versuchen von Bezold (1874) rührt der Wettstreit der Sehfelder für verschiedene Farben davon her, daß die Brechung verschiedener Farbenstrahlen eine verschiedene ist, daß daher die eine Farbe ein undeutliches Netzhautbild hervorbringt, wenn das Bild der anderen deutlich ist, und daß deßhalb endlich, wenn den Augen zwei Farben dargeboten werden, bald das eine, bald das andere Auge sich für die betreffende Farbe zu accommodiren sucht, durch welche Accommodationsschwankungen der Wettstreit entsteht. Beseitigte man diese Accommodationsschwankungen, so müßte nach dieser Erklärung der Wettstreit aufhören. Die Beseitigung ist nach Bezold zu erreichen, wenn man die höhere Farbe dem Auge soviel näher rückt, daß durch ihre stärkere Augenbrechung ihr Bild in derselben Entfernung entsteht, wie das Bild der niedrigeren Farbe durch ihre schwächere Augenbrechung, z. B. wenn man eine ultramarinblaue Fläche dem einen Auge 2—3c näher bringt als eine carminrothe Fläche dem anderen Auge. Ist auf diese Weise der Wettstreit beseitigt, und entfernt man sich nun bei festgehaltener Accommodation so weit, daß verwaschene Doppelbilder entstehen, so verschmelzen die mittleren, wo sie sich decken, zu der Mischfarbe. Diese binoculare Farbenmischung führt zu denselben Ergebnissen wie die Mischung auf dem Farbenkreisel. Ob durch diese neuen Versuche die Streitfrage über den Wettstreit vollständig entschieden ist, muß noch dahin gestellt bleiben.

Dove entdeckte (1850), daß zwei Bilder von verschiedener Helligkeit und verschiedener Farbe im Stereoskop mit **Glanz** erscheinen, daß dagegen bei gleicher Helligkeit und gleicher Farbe das stereoskopische Gesammtbild matt sei. Ein schwarzes und ein weißes Papierblatt, oder ein weißes Blatt mit schwarzen Strichen und ein schwarzes mit weißen Strichen geben im Stereoskop ein graphitglänzendes Bild. Oppel (1854) erklärt diesen und überhaupt jeden Glanz als das Resultat geringer Verschiedenheit der 2 Netzhautbilder; ein Körper glänzt nur, wenn er eine glatte Oberfläche oder glatte Oberflächentheilchen hat; solche glatte Oberflächen reflectiren das Licht aber nur nach einer Richtung; fällt dieselbe in das eine Auge, so trifft sie das andere nicht oder nur wenig; diese Verschiedenheit bilde das Eigenthümliche des Glanzes; wenn man demnach ein Gesammtbild aus zwei etwas verschieden hellen Bildern erzeuge, so müsse dasselbe ebenfalls Glanz haben.

Wenn man nach Dove im Stereoskop zwei verschiedene Farben in gleicher Entfernung anbringt, so muß das eine Auge eine etwas andere Accommodation vornehmen als das andere; es erscheint dann die eine Farbe so, als ob sie etwas weiter entfernt wäre wie die andere, und das Gesammtbild erhält hierdurch Glanz. So entsteht auch der farbige Glanz durch Verbindung des an der glatten Oberfläche reflectirten Tageslichtes mit dem aus der Tiefe reflectirten Farbenlichte. Die Metalle haben bekanntlich Oberflächenfarben, womit ihre hohen Brechungsexponenten, ihre starke Reflexion, Undurchsichtigkeit und anomale Dispersion zusammenstimmen. Ein Beispiel dafür, daß die Metalle eine der anomalen Dispersion entsprechende auswählende Absorption besitzen, gibt die grüne Farbe dünner Goldplättchen im durchgelassenen Lichte. Durch die Vereinigung der Oberflächenfarbe der Metalle mit dem aus einiger Tiefe reflectirten Lichte entsteht der **Metallglanz**. Davon überzeugt das Beispiel des Indigo; das aus der Tiefe reflectirte Licht ist blau; bringt man zu demselben noch eine Oberflächenfarbe, indem man die Oberfläche glatt reibt, so entsteht der Kupferglanz des Indigo. Auch das Stereoskop bestätigt jene Erklärung; betrachtet man die 2 erwähnten gestrichelten Papierblätter im Stereoskop durch ein rothes Glas, so entsteht Kupferglanz; gelbe und blaue Einlagen durch ein violettes Glas gesehen glänzen metallisch. Die Metalle sind auch noch ausgezeichnet durch die elliptische Polarisation (383.).

Mängel der Augen. Außer der schon erwähnten mangelhaften Accommodationsfähigkeit der brachymetropischen und hypermetropischen Augen gibt es noch mehrere Augenfehler; die gewöhnlichsten sind: 1) das Schielen, eine Divergenz der Augenachsen, hervorgebracht durch ungleiche Anheftung zweier zusammengehörigen Muskeln, durch mangelhafte Functionirung eines Augenmuskels, durch gestörte Innervation derselben u. s. w.; das Schielen ist manchmal heilbar durch Einschneiden eines Augenmuskels. 2) Der graue Staar, eine Trübung der brechenden Medien, insbesondere der Krystalllinse, und in diesem Falle durch Herausnehmen derselben heilbar. Manchmal ist auch die Hornhaut bis zur Undurchsichtigkeit getrübt, eine unheilbare Blindheit. 3) Der schwarze Staar, eine Aufhebung des Perceptionsvermögens entweder in der Netzhaut selbst oder im Sehnerven oder in dem Theile des Gehirns, dem der Lichtreiz zugeführt werden soll, eine unheilbare Blindheit. 4) Die Farbenblindheit ist die Eigenschaft, eine der drei Young'schen Grundfarben oder zwei derselben nicht wahrnehmen zu können, was auf der Unempfindlichkeit einer oder zwei der Young'schen Fasern beruhen mag. Man unterscheidet hiernach Rothblindheit (der häufigste Fall), Grünblindheit und Violettblindheit (der seltenste Fall). Dem Rothblinden erscheint Roth wie Schwarz, die helleren Rothstufen blaugrün. Blaugrün und Weiß sind für ihn gleich oder höchstens in der Helligkeit verschieden; er sieht eigentlich nur Grün und Violett und deren Uebergangstöne in verschiedenen Helligkeitsstufen. Gelb erscheint ihm wie Grün, aber er unterscheidet doch Gelb von Grün, weil sie einen Unterschied in der Helligkeit haben, ja er spricht sogar viel von Gelb, weil er doch Unterschiede im Grün merkt und diese sein Interesse erwecken. Der Grünblinde sieht Grün und Schwarz gleich, helle Stufen von Grün nennt er Roth, verwechselt also beide wie der Rothblinde, nur daß diesem Roth wie Grün erscheint. Nur Roth und Blau nebst ihren Zwischenstufen nimmt er wahr, Gelb erscheint ihm hellroth, Weiß und Rosa sind einander gleich, das Spectrum ist nur Roth und Blau, bei Grün steht ein grauer Streifen. Violettblindheit oder gar Blindheit für zwei Farben sind nur sehr selten und nicht genau beobachtet worden; Violettblindheit kann künstlich durch Genuß von Santonin, dem Alkaloid des Artemisia-Extractes erzeugt werden. Die Farbenblindheit ist gewöhnlich angeboren und erblich und wird gewöhnlich erst spät und schwer erkannt; auch ist sie schon durch Augenanstrengung im Dämmerlicht entstanden. 357

Die optischen Kästen. Die **Camera obscura** (Porta 1658) und die **Photographie** (Niepce 1824, Daguerre 1838, Talbot 1839). In der optischen Kammer (s. 283.) sind die Bilder nur bei kleiner Oeffnung scharf, werden aber 358

dann wegen geringer Lichtmenge undeutlich; zur Beseitigung dieses Mißstandes setzte Porta in die Oeffnung eine biconvexe Linse, welche nach der zweiten Linsenregel von entfernten Gegenständen auf der entgegengesetzten Seite reelle, verkleinerte, umgekehrte Bilder in der Nähe des Brennpunktes erzeugt. Ist daher eine solche Linse in eine Wandöffnung eines, zur Absorption zerstreuten Lichtes inwendig geschwärzten, Kastens eingesetzt und befindet sich in der Nähe des Brennpunktes ein Schirm, eine matte Glastafel oder drgl., so entstehen auf derselben Bilder äußerer Gegenstände. Da nach den Linsengesetzen die Bildweite nach der Gegenstandsweite veränderlich ist, so ist die Dunkelkammer mit Ausziehvorrichtungen sowohl für die Linse als auch für die Bildtafel versehen.

Man erhält hierdurch die Bilder auf einer senkrechten Wand; um sie auf der oberen wagrechten Kastenwand zu erhalten, bringt man in der Kammer einen Spiegel unter 45° an, der die Strahlen nach oben reflectirt, wo sie sich auf einer matten Glastafel zu von außen sichtbaren Bildern vereinigen (Camera clara); um sie auf der unteren Wand zu erhalten, läßt man die vom Gegenstande kommenden wagrechten Strahlen durch einen solchen auf dem Kasten stehenden Spiegel in die Linse nach unten reflectiren; Spiegel und Linse können hier durch ein Prisma vertreten sein, dessen Hypotenuse eben und spiegelnd und dessen Katheten linsenartig gekrümmt sind. Auf der Spitze eines Zeltes angebracht geben Spiegel und Linse Bilder der Außendinge auf einem Tische im Zelte.

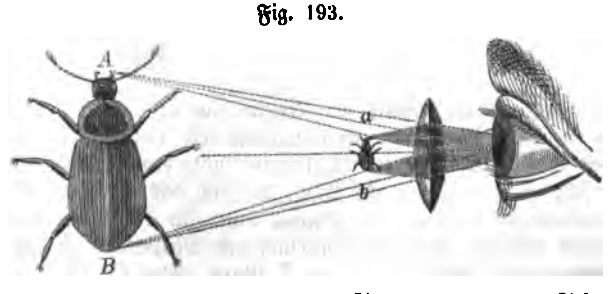
Die erste Einrichtung ist in der Photographie gebräuchlich, welche sich die Aufgabe stellt, das Bild der Dunkelkammer festzuhalten. Niepce benutzte dazu Asphalt, Daguerre eine jodirte Silberplatte (Daguerreotypie), Talbot mit Chlorsilber getränktes Papier (Talbotypie), Archer (1851) nach Grays Vorschlag eine Glastafel, die mit einer jodsilberdurchtränkten Collodiumschicht überzogen ist; die beiden letzten Methoden vereinigt bilden jetzt die Photographie. Eine Glasplatte wird mit Collodium begossen, das mit Alkohol gemischt ist und etwas Jodkalium enthält; diese Platte taucht man in einem dunkeln Raume in das Silberbad d. i. in eine wässerige Lösung von Silbernitrat, wodurch Jodsilber entsteht. Dann wird die Tafel in die Camera obscura gebracht, die mittels eines Petzval'schen aplanatischen Objectives deutliche Bilder erzeugt; genau an der Bildstelle, die schon vorher festgestellt worden ist, wird die Tafel angebracht. An den hellen Stellen des Bildes wird durch das Licht das Jodsilber zersetzt; das Silber scheidet sich in unendlich feinem, schwarzem Pulver aus, wodurch die hellen Stellen geschwärzt werden, während die dunkeln hell bleiben. So entsteht das negative Bild. Indessen würde eine ausreichende Zersetzung lange Zeit beanspruchen; man benutzt daher die Thatsache, daß die vom Lichte nur eben getroffenen Stellen, wenn auch noch nicht zersetzt, doch leichter zersetzbar sind, und läßt die Glastafel nur für kurze Zeit in der Dunkelkammer, um dann durch Begießen mit Pyrogallussäure oder mit Ferrisulfat die Reduction zu vollenden und dadurch das Negativ hervorzurufen. Ist dies geschehen, so muß das Jodsilber der hellen Stellen entfernt werden, weil sonst am Tageslichte die ganze Tafel sich schwärzen würde; hierzu wird Natriumhyposulfit benutzt, welches das Jodsilber löst und dann durch Abwaschen mit Wasser entfernt wird; so ist das Negativ fixirt. Zur Darstellung des Positiv wird das Papier auf eine Kochsalzlösung gelegt, zwischen Fließpapier etwas getrocknet und dann mit derselben Seite auf Höllensteinlösung gebreitet, wodurch es mit Chlorsilber getränkt wird. Dieses Papier legt man nun auf das Negativ, darauf schwarzes Tuch und setzt diese Verbindung in einen Rahmen gefaßt so der Sonne aus, daß das Licht durch das Negativ dringen muß, um auf das Papier zu kommen. Die hellen Stellen des Negativ lassen das Licht durch, hinter ihnen wird daher das Chlorsilber zersetzt und das Papier geschwärzt. Das so erhaltene Positiv wird dann durch Natriumhyposulfit und Wasser fixirt. — Das Ideal der Photographie, die Photochromie, d. i. die Erzeugung von Bildern in natürlichen Farben ist Gegenstand mancher Versuche gewesen. Schon Seebeck und J. Herschel bemerkten die Färbung des Chlorsilbers durch farbiges Licht und Bequerel erzeugte zuerst ein Nachbild des Sonnenspectrums auf Silberplatten. Niepce und Poitevin folgten ihm, und Letzterem gelang es, auf Papier Photochromieen anzufertigen, welche indeß nicht lichtbeständig waren. Zenker zeigte auf der Naturforscherversammlung zu Frankfurt (1867) farbige Photographien. Ducos de Hauron (1869) setzt Youngs Theorie von den drei Grundfarben gemäß farbige Bilder aus einem rothen, einem blauen und einem gelben durchsichtigen Bild auf Gelatin zusammen, wofür Husnik (1871) die Photolithographie benutzt. Practisch ist die Methode für Porträts noch nicht, weil die Entstehung der farbigen Negative zu viel Zeit erfordert. — Die Photographie wird in der Meteorographie zur selbstthätigen Aufzeichnung des Thermometer- und Barometerganges, der Magnetnadelschwankungen u. s. w. benutzt.

359 Das **Grimakistiskop** von Mauvillin (1866) erzeugt Zerrbilder von Photographieen u. drgl., indem die Linse, mit feinen, ungleichen Streifen und anderen Unregelmäßigkeiten versehen worden ist. — Die Zauberlaterne oder Laterna magica von Kircher (1646) benutzt die vierte Linsenregel, daß eine Sammellinse von nahe am Brennpunkte gelegenen Gegenständen in größerer Entfernung ein umgekehrtes, vergrößertes, reelles Bild erzeugt. Das directe und von einem Hohlspiegel reflectirte Licht einer in dem Kasten befindlichen Lampe wird durch eine convexe Linse gesammelt und auf eine Glastafel oder Transparent geworfen, auf welchem die darzustellenden Gegenstände abgebildet sind; die von hier ausgeworfenen Strahlen werden dann durch eine Sammellinse auf einer entfernten Wand vereinigt (Gespenster-Erscheinungen und Phantasmagorieen des vorigen Jahrhunderts). Jetzt benutzt man zu Geisterscenen auf Theatern den ebenen, reinen Glasspiegel, der auf der Vorderhälfte der Bühne schief aufgestellt dem Publicum subjective Bilder von Gegenständen entwirft, die unter der Bühne grell von einer elektrischen Lampe erhellt aufgestellt sind. Die Laterna magica hat noch Anwendung zu Nebelbildern (Dissolving views); zwei Zauberlaternen, deren Oeffnungen halb verdeckt sind, erzeugen auf einem transparenten Schirme ein gemischtes, nebelhaftes Bild. Wird nun durch Schieber die eine Oeffnung immer mehr geöffnet und die andere immer mehr geschlossen, so verschwindet das eine Bild allmälig, während das andere immer deutlicher wird; rühren diese Bilder von mehreren Glastafeln her, so können durch Verschiebungen einer oder mehrerer Tafeln Theile der Bilder sich bewegen. Aehnlich sind die Polyoramen, Dioramen, Megaskope, Phantaskope, Wunderkammern u. drgl., sowie das Sciopttikon von Talbot.

360 Das **Sonnenmikroskop** (Lieberkühn 1738) erzeugt von sehr kleinen Gegenständen sehr große objective Bilder; zu diesem Zwecke müssen die sehr kleinen Gegenstände ein sehr lebhaftes Licht ausstrahlen, damit noch jeder Theil des Bildes zur Sichtbarkeit ausreichendes Licht empfange. Man benutzt hierzu Sonnenlicht, dessen Strahlen durch einen Heliostat in das am Fensterladen befestigte Instrument geleitet und durch eine Linse auf den Gegenstand concentrirt werden, oder auch Knallgaslicht (Hydro-Oxygen-Gas-Mikroskop) oder das elektrische Kohlenlicht (Photoelektrisches Mikr.); das kleine Object, ein Mückenfuß, ein Krümchen Käse mit Käsmilben, Schmetterlingsstaub, ein Tropfen mit Infusorien oder im Krystallisationszustande u. s. w. befindet sich in einem dunkeln Kasten außerhalb der Brennweite, aber sehr nahe an dem Brennpunkte einer Sammellinse, damit nach der vierten Linsenregel jenseits derselben in großer Entfernung ein vergrößertes Bild entstehe. In der Gl. $d = bf : (b - f)$ die leicht aus der Linsenformel $^1/b + {}^1/d = {}^1/f$ zu erhalten ist, muß d demnach nahezu $= f$ sein; folglich darf der Factor $b : (b - f)$ nur wenig von 1 abweichen; also muß f einen sehr kleinen Werth haben. Die Objectivlinse des Sonnenmikroskops muß eine sehr kleine Brennweite haben, muß stark gekrümmt und daher klein sein. Die lineare Vergrößerung wird nach Fl. $f : (d - f)$ berechnet (s. 304. 2); sie ist um so bedeutender, je kleiner $d - f$, je näher also f und d einander kommen, d. h. ebenfalls, je näher das Object am Brennpunkte liegt. Die Flächenvergrößerung ist das Quadrat der linearen. Das optische Institut von Powell und Lealand in England hat ein Objectiv von $^1/_2$mm Brennweite angefertigt, daß eine lineare Vergrößerung $= 3000$ und demnach eine Flächenvergrößerung von 9 Mill. möglich macht.

361 **Das Mikroskop** (Hans und Zacharias Janssen in Middelburg 1590). 1. Die Lupe oder das einfache Mikroskop dient dazu, sehr kleine dem Auge sehr nahe gebrachte Gegenstände deutlich und vergrößert zu sehen. Ist nämlich ein Gegenstand ab (Fig. 193) dem Auge sehr nahe, so erscheint er zwar unter einem großen Gesichtswinkel, also vergrößert, aber undeutlich, weil er sich innerhalb der deutlichen Sehweite, 20°, befindet. Durch eine Sammellinse nun, die man zwischen das Auge und den Gegenstand bringt und zwar so, daß der Gegenstand innerhalb der Brennweite liegt, entsteht nach der sechsten Linsenregel auf der Seite des Gegenstandes ein imaginäres, entfernteres, vergrößertes, aufrechtes Bild für ein

Fig. 193.

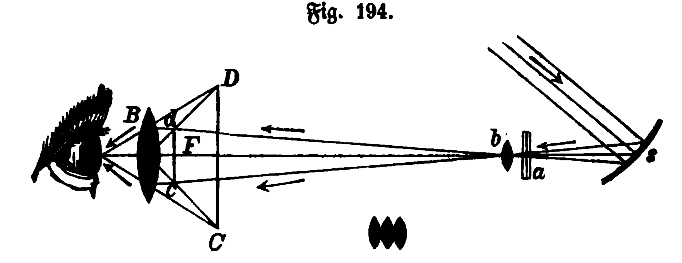


Auge, das sich auf der anderen Seite der Linse befindet. Das Auge sieht deßhalb einen sehr nahen Gegenstand durch eine Sammellinse scheinbar in die Weite des deutlichen Sehens gerückt und vergrößert; die Sammellinse ist daher eine Lupe, ein einfaches Mikroskop. Die Vergrößerung folgt aus der Formel $1/b + 1/d = 1/f$, in welcher b negativ zu setzen ist, da sich Gegenstand und Bild auf derselben Seite befinden. Aus der entstehenden Gleichung $1/d - 1/b = 1/f$ folgt $d = bf : (b + f)$. Nun verhält sich aber nach 304.2 oder auch nach Fig. 193 die Größe AB des Bildes zu der des Gegenstandes ab wie $b : d$; dieses Verhältniß, die lineare Vergrößerung nimmt durch Einsetzung des Werthes für d die Form an $(b + f) : f$ oder annähernd $b : f$. Statt b muß hier die deutliche Sehweite gesetzt werden. Diese Formel zeigt, daß die Vergrößerung um so bedeutender ist, eine je kleinere Brennweite die Lupe hat.

Je kleiner die Brennweite einer Linse wird, desto größer wird die sphärische und die chromatische Abweichung; die starke Vergrößerung entsteht daher auf Kosten der Deutlichkeit; auch bieten Linsen von kleiner Brennweite d. i. kleine Linsen nur ein kleines Gesichtsfeld dar, in welchem wegen der starken Vergrößerung das Licht sehr schwach ist, so daß kleine Lupen die Augen sehr anstrengen. Man kann zwar die sphärische und die chromatische Abweichung durch Verbindung zweier Linsen schwächen, wie es bei Fraunhofers, Wilsons und Plößls Lupe geschehen ist, aber nicht ganz beseitigen. Die sphärische Abweichung ist auch bei den deutschen Cylinderlupen gering, weil die beiden Krümmungen verschieden sind, sowie bei Coddingtons und Brewsters Lupe, welche die Randstrahlen durch Einschnitte und Einschnürungen in der Mitte des Glascylinders beseitigen; aber diese Lupen müssen zu nahe an das Object gehalten werden. Auch bei Edelsteinlupen sind bei gleicher Vergrößerung die Abweichungen geringer, weil die Brechung derselben stärker ist als bei Glaslupen; Glaskügelchen und Wassertropfen können stark gekrümmte Lupen bilden, ohne die Schwierigkeiten des Schleifens zu bieten. Obwohl nun mittels der Lupe, welcher Name gewöhnlich einer etwa 20 fach vergrößernden Linse ohne Stativ und Objecttisch zukommt, und mit dem einfachen Mikroskop, das aus einer bis 200fach vergrößernden Lupe mit Stativ, Objecttisch und Beleuchtungsspiegel besteht, bedeutende Forschungen bis in unser Jahrhundert gemacht wurden, so ist doch das zusammengesetzte Mikroskop jetzt in allgemeiner Anwendung.

362 2. Das zusammengesetzte Mikroskop besteht aus einer oder mehreren Sammellinsen, die dem Gegenstande zugerichtet sind und daher das Objectiv bilden, und einer für das Auge bestimmten Sammellinse, die daher Ocular genannt wird (Fig. 194). Das Objectiv b hat eine sehr kleine Brennweite und entwirft deß-

Fig. 194.



halb von einem jenseits der Brennweite nahe am Brennpunkte gelegenen Objecte a ein umgekehrtes und stark vergrößertes, reelles Bild dc auf der anderen Seite der Linse. Das Ocular B ist eine Lupe, durch welche dieses reelle Bild betrachtet wird; sie hat eine solche Lage, daß sich das Bild des Objectivs innerhalb ihrer Brennweite befindet und erzeugt daher für das Auge ein vergrößertes Bild DC dieses Bildes. Die Vergrößerung des Mikroskops ist das Product der Vergrößerungen des Objectivs und des Oculars. Das Object a wird von einem Spiegel s beleuchtet; das von demselben kommende Lichtbündel kann durch eine drehbare Blende nach Bedürfniß verändert werden.

Die **Reinheit** der mikroskopischen Bilder bedingt die Beseitigung der chromatischen und der sphärischen Abweichung beider Linsensysteme. Der Achromatismus des Objectives wird durch die bekannte Verbindung einer Convexlinse von Crownglas mit einer Concavlinse von Flintglas erzielt; die sphärische Abweichung desselben wird durch Verbindung von mehreren solcher achromatischen Linsen beseitigt (Selligue 1824); diese bedürfen auch nicht einer so kleinen Brennweite, weil 2 Linsen von doppelter Brennweite dasselbe leisten wie eine von einfacher Brennweite, können also leichter angefertigt werden, und außerdem läßt jede folgende Linse die Randstrahlen der vorhergehenden nicht durch, womit die sphärische Abweichung wegfällt. Der Achromatismus des Oculars wird meistens durch eine eigene Verbindung zweier planconvexen Linsen bewirkt, welche Campanis Ocular (1655) genannt wird und in eine Röhre gefaßt ist. Die zweite und größere dieser Linsen nimmt die vom Objectiv kommenden Strahlen vor ihrer Vereinigung auf, vergrößert ihre Convergenz und erzeugt so ein näheres und kleineres Bild; sie wird auch Collectiv genannt; die erste, am Auge befindliche Linse, das eigentliche Ocular hat eine solche Lage und Größe, daß die verschiedenfarbigen Bilder des Collectivs sich gegenseitig decken. Diese Verdoppelung des Oculars und ein zwischen seinen beiden Theilen angebrachtes Diaphragma hebt die sphärische Abweichung des Oculars auf.

Das **Gesichtsfeld** des zusammengesetzten Mikroskops übertrifft bedeutend das der Lupe. Weil nämlich das Objectiv schon eine starke Vergrößerung bewirkt, so ist beim Ocular eine solche nicht mehr nöthig, ja sie ist sogar verwerflich, weil sonst die nicht zu vermeidenden Ungenauigkeiten des Objectivbildes vergrößert würden; deßhalb wird das Ocular groß genommen und bietet daher auch ein großes Gesichtsfeld; denn dasselbe wird durch den Winkel gemessen, unter welchem das Ocular von der Mitte des Objectivs aus erscheint. Das Campani'sche Ocular verdoppelt dieses Gesichtsfeld noch. Man vergleicht die Gesichtsfelder verschiedener Mikroskope durch die Anzahl der mikrometrischen Glasfelder einer und derselben Mikrometerplatte, welche zur Ausfüllung der Gesichtsfelder nöthig sind.

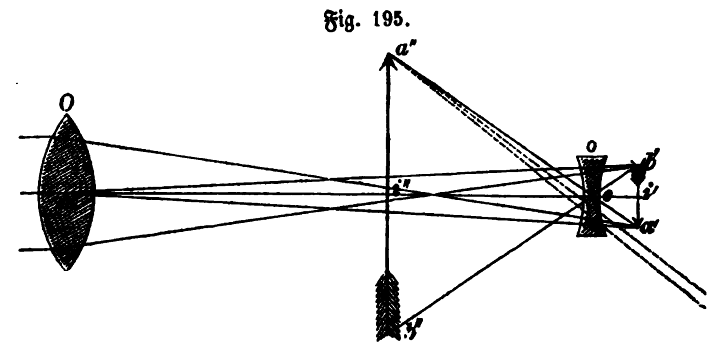
Die **Vergrößerung** des Mikroskops ist um so stärker, je kleiner die Brennweiten der beiden Gläser sind; sie geschieht auf Kosten der Helligkeit, der Schärfe und des Gesichtsfeldes. Man hat daher bei jedem Mikroskop mehrere Oculare, um nach Bedürfniß größere Schärfe oder stärkere Vergrößerung zu gewinnen. Obwohl die Vergrößerung berechnet werden kann, wenn man die Brennweiten kennt, so ist doch auch eine practische Auffindung derselben erforderlich. Man legt als Object ein Glasmikrometer unter und neben dasselbe ein Papierblatt, auf welchem man mittels der Camera lucida die gesehenen Theilstriche nachzeichnet. Sind dieselben z. B. auf der Platte nur $^1/_{100}$mm, auf der Zeichnung aber 4mm von einander entfernt, so ist die Vergrößerung eine 400fache. Helmholtz (1873) berechnet theoretisch die Größe der kleinsten, mit Mikroskopen wahrnehmbaren Distanz auf $^1/_{3636}$mm; hiernach wären die Angaben von Sollitt und Harrison, daß von den erkennbaren Linien der Navicula Arcus 5120 auf 1mm gingen, zu bezweifeln. Die stärkste Vergrößerung gewann Hartnack in Paris (1867), der Nachfolger Oberhäusers, mit seinem Immersionsmikroskop, in welchem das unterste Objectiv in einen Tropfen Wasser, Glycerin oder Mohnöl tauchte. Mit einem solchen Mikroskop wäre noch eine Distanz von $^1/_{4848}$mm erkennbar, vorausgesetzt, daß Strahlen von 180° Divergenz zur Vereinigung gelangen könnten. Da dies jedoch nicht möglich ist, so beträgt nach Harting die kleinste Distanz nur $^1/_{3313}$mm. Durch die von Helmholtz vorgeschlagene Anwendung von blauem Lichte steigerte Hartnack (Wiener Ausstellung 1873) die Leistungsfähigkeit seiner Immersionsmikroskope bis zur Wahrnehmung von $^1/_{4651}$mm.

Die **Prüfung** eines Mikroskops muß sich außer der Vergrößerung und dem Gesichtsfelde auch auf die Helligkeit und Schärfe erstrecken. Ein gutes Mikroskop muß mit 300facher Vergrößerung noch bei einer Kerzenflamme hinreichend helle Bilder geben. Hinsichtlich der Schärfe unterscheidet man die definirende Schärfe, welche sich auf die Genauigkeit der Umrisse bezieht, und die penetrirende Schärfe, welche eine genaue Wiedergabe der inneren Einzelnheiten verlangt. Zur Prüfung benutzt man besonders die Flügelschuppen eines Schmetterlings (Hipparchia Janira, gelbes Sandauge), besser aber die Nobert'schen Platten und die Peters'schen Kleinschriften; auf $^1/_{1600}$ bis $^1/_{365000}$ □" engl. ist das „Vater unser" geschrieben. Die Deutlichkeit ist durchschnittlich bei 300—400facher Vergrößerung am größten, richtet sich aber sehr nach der Beschaffenheit der Objecte. — Das Mikroskop hat unermeßliche **Anwendungen** zum Studium des inneren Baues des Menschen, der Thiere, der Pflanzen, zur Erkennung der kleinsten Thier- und Pflanzenformen, der Krystalle, der Bodenarten, dann in der Pathologie, Technik, gerichtlichen Medicin, in der mikroskopischen Geologie u. s. w.

Das Fernrohr (Zacharias Janssen 1600). Man unterscheidet Linsenfernrohre oder Refractoren und Spiegelfernrohre oder Reflectoren. Der Name Teleskop wird vorzugsweise den letzteren, der Name Fernrohr vorzugsweise den ersteren gegeben. 363

a) Refractoren. 1. Das holländische oder Galilei'sche Fernrohr (Fig. 195) besteht aus einer biconvexen Linse O von großer Brennweite als Objectiv und einer biconcaven Linse o von kleinerer Brennweite als Ocular. Die

Fig. 195.



Vergrößerung ist gleich dem Quotient der beiden Brennweiten, die Länge des Fernrohres d. i. die Entfernung der beiden Linsen ist gleich der Differenz der Brennweiten, das Gesichtsfeld ist die Oeffnung eines Kegels, dessen Spitze der Mittelpunkt des Objectivs und dessen Basis die Pupille ist.

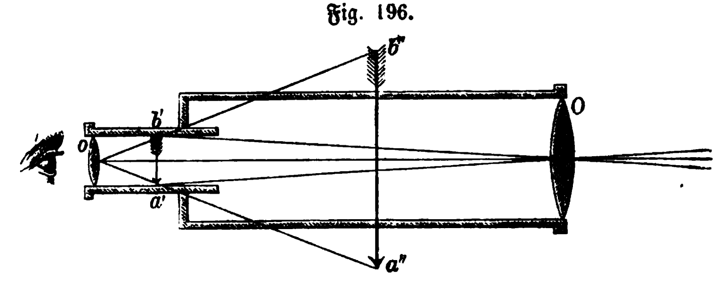
Durch das convexe Ocular würde nach der 2ten Linsenregel von einem entfernten Gegenstande ab ein umgekehrtes, reelles, verkleinertes Bild a'b' in der Nähe des Brennpunktes entstehen. Das concave Ocular hat aber eine solche Stellung, daß die Strahlen vor der Vereinigung auf dasselbe fallen, und zwar ist die Entfernung des Oculars von a'b' etwas größer als die Zerstreuungsweite (Brennweite) des Oculars. Es werden hierdurch (s. 305.) die convergenten Strahlen divergent und kreuzend gemacht, wodurch für das Auge das Bild abermals umgekehrt und daher aufrecht, außerdem aber vergrößert erscheint. Der Strahl a'm geht in gerader Richtung nach a; daher ist i'ma' der halbe Gesichtswinkel des Objectes von m aus, oder, da das Fernrohr gegen die Objectdistanz klein ist, vom Auge aus. Der halbe Gesichtswinkel des Bildes ist a''ci'' = i'ca'. Das Verhältniß dieser Winkel gibt die Vergrößerung. Nun ist tang i'ma' = i'a' : i'm = i'a' : f, da i'm sehr nahe die Brennweite f des Objectivs ist; ebenso ist tang i' ca' = i'a' : i'c = i'a' : f', da i'c nahe gleich der Brennweite f' des Oculars ist. Bei diesen kleinen Winkeln ist das Verhältniß der Winkel sehr nahe gleich dem Verhältnisse der Tangenten; folglich ist die Vergrößerung = (i'a' : f') : (i'a' : f) = f : f'. Hieraus ist leicht ersichtlich, daß das Objectiv eine große und das Ocular eine kleine Brennweite haben muß, daß also auch die erstere Linse groß, die letztere klein wird. Indessen darf die letztere doch nicht sehr klein werden, weil sonst das Gesichtsfeld, dessen Basis sich bei ruhigem Sehen, wegen der starken Divergenz der aus dem Ocular tretenden Strahlen auf die Pupille beschränkt, nicht durch Bewegungen des Kopfes etwas erweitert werden könnte; deßhalb sind keine bedeutenden Vergrößerungen mit diesem Fernrohre zu erreichen; es wird daher nur in Fällen verwendet, wo eine geringe Länge bei mäßiger Vergrößerung verlangt wird, wie bei Operngucken, Feldstechern u. drgl.; denn die Entfernung der beiden Linsen ist nur gleich i'm — i'c = f — f'. Trotzdem entdeckte Galilei mit diesem Fernrohre, daß er auf die erste Kunde hin selbständig erfand, die Berge und Krater des Mondes, die Jupitertrabanten, den Saturnring, die Sonnenflecken, die Lichtphasen der Venus, löste die Milchstraße und die Krippe in Sterne auf. In der Astronomie wurde es verdrängt durch

364 2. Das Keppler'sche oder astronomische Fernrohr (Keppler 1611, Scheiner 1617). Es besteht aus einer Sammellinse von großer Brennweite als Objectiv und einer Sammellinse von kleiner Brennweite als Ocular. Das Bild ist umgekehrt; seine Vergrößerung ist gleich dem Quotient der beiden Brennweiten, seine Länge gleich der Summe derselben, und sein Gesichtsfeld gleich der Oeffnung eines Kegels, dessen Grundfläche das Ocular und dessen Spitze der Mittelpunkt des Objectivs ist; die Helligkeit wächst mit der Fläche des Objectivs.

Der Strahlengang dieses Fernrohres ist aus Fig. 196 ersichtlich; durch das Objectiv O entsteht nach der 2ten Linsenregel von einem entfernten Gegenstande ab in der Nähe des

Brennpunktes ein umgekehrtes, verkleinertes, reelles Bild a'b', welches durch das Ocular wie durch eine Lupe betrachtet wird und daher vergrößert, aber nicht zum zweitenmale umgekehrt wird; die erste Umkehrung bleibt daher bestehen; die Vergrößerung wird wie bei

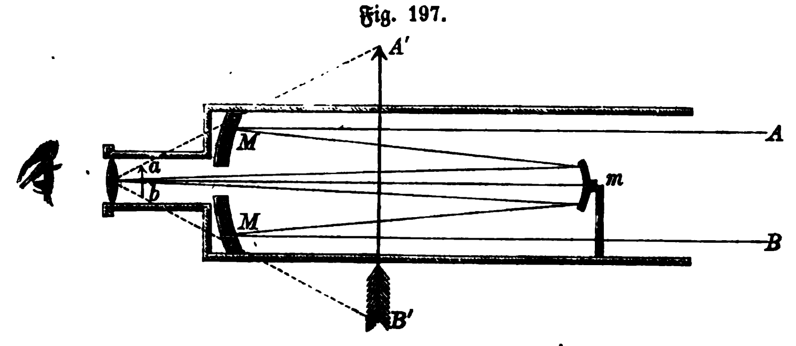
Fig. 196.



dem Galilei'schen Fernrohre bewiesen. Da a'b' in der Nähe des Brennpunktes beider Linsen steht, so ist die Entfernung derselben von einander gleich der Summe der Brennweiten. Die auf das Ocular gelangenden Lichtstrahlen kreuzen sich in dem Mittelpunkte des Objectivs; daher gehören Strahlen, welche außerhalb derjenigen liegen, die zu dem kreisförmigen Rande des Oculars gelangen, nicht mehr zu dem Gesichtsfelde, woraus der Satz über das Gesichtsfeld folgt. Das Ocular ist bei diesen wie bei anderen Fernrohren verschiebbar, damit das Bild in die Weite des deutlichen Sehens gerückt werden kann; je näher das Object liegt, um so weiter rückt das Bild vom Objectiv weg, um so weiter muß das Ocular ausgezogen werden; soll das Fernrohr als Meßinstrument dienen, so ist in demselben ein Fadenkreuz angebracht, das mit dem Ocular verschiebbar ist. Zwar ist die umgekehrte Lage der Bilder ein Nachtheil dieses Fernrohres, der indeß bei astronomischer Anwendung nicht stört; dasselbe gewährt aber ein ziemlich großes Gesichtsfeld und ausreichende Helligkeit, wodurch es möglich wird, durch Vergrößerung des Objectivs die bedeutendsten Bildvergrößerungen zu gewinnen, während bei einem und demselben Fernrohre die Aufsetzung kleinerer Oculare ebenfalls eine Vermehrung der Bildgröße möglich macht. Vor Erfindung der Achromasie durfte man kleine Oculare wegen ihrer starken Farbenzerstreuung nicht anwenden; man suchte sich durch große Objective zu helfen, wodurch aber die Fernrohre unhandlich lang und biegsam wurden. Huyghens (1684) befestigte daher das Objectiv auf einer hohen Stange, einem Mastbaume, einem Giebel und sah von unten mittels des Oculars durch dasselbe, und Newton, an dem Achromatismus verzweifelnd, warf sich auf die Spiegelfernrohre. Als nun dennoch der Achromatismus erfunden wurde und durch Fraunhofer das Geheimniß einer guten Flintglasbereitung aufgedeckt war, wandte man sich wieder den Linsenfernrohren zu. Fraunhofer lieferte seine großen Instrumente nach Pulkowa (bei Petersburg), Boston (14'' Oeffnung, 21' Brennweite, 2000 f. Vergrößerung). Der größte Refractor ist der von Vicar Craig zu Wandsworth (24'' Oeffn., 72' engl. Brennw.), Powell und Lealand verfertigten zuletzt ein Objectiv von 25'' Oeffn. — Nach Littrow (1832) kann man auch die Flintglaslinse in einiger Entfernung von der Crownglaslinse aufstellen, ohne den Achromatismus zu beeinträchtigen, und bedarf dann nur kleinerer Flintglaslinsen; solche dialytischen Fernrohre können eine große Oeffnung und daher eine große Lichtstärke und außerdem ein großes Gesichtsfeld erhalten, sind daher besonders geeignet als Kometensucher, Marinefernrohre u. dergl. — Zur practischen Messung der Vergrößerung sieht man mit dem einen Auge durch das Fernrohr, und mit dem anderen Auge direct nach einem entfernten Maßstabe und zählt, wie viele Skalentheile mit freiem Auge auf einen Theil im Fernrohre fallen. Zur Prüfung der Deutlichkeit benutzt man die Doppelsterne, zur Prüfung der raumdurchdringenden Kraft die Fixsterne 8—15ter Größe, zur Messung des Gesichtsfeldes die Zeit, die ein Stern zum Gange durch das Gesichtsfeld braucht. Zu genauen Messungen dient das Fadenkreuz oder das Glasmikrometer, zum Einstellen der Sucher, ein kleines paralleles Fernrohr mit großem Gesichtsfelde. Die kleinen Fernrohre, Perspective oder Feldstecher, können auch als Distanzmesser dienen, wenn sie mit einem Mikrometer versehen sind. Für irdische Beobachtung ist indeß die umgekehrte Lage der Bilder im astronomischen Fernrohre störend; man schaltete daher nach Keppler noch eine dritte Sammellinse ein, welche die Aufrechtstellung bewirkte, aber das Gesichtsfeld sehr verkleinerte. Erst Rheita zeigte (1665), daß man mittels eines Oculars von 4 planconvexen Linsen ein aufrechtes Bild bei gutem Gesichtsfelde erlangen könne; doch wird hierdurch eine bedeutende Lichtschwächung herbeigeführt (Erdfernrohr).

365 b) **Reflectoren.** 1. **Das Gregory'sche (1663) Teleskop** (Fig. 197). Es besteht aus einem in der Mitte durchbrochenen großen parabolischen Hohlspiegel MM, der nach der zweiten Hohlspiegelregel von einem entfernten Gegenstande AB in

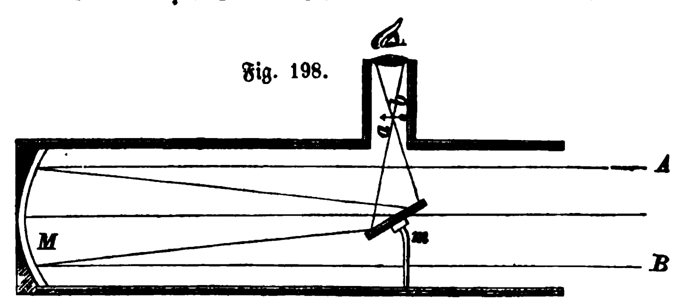
Fig. 197.



der Nähe des Brennpunktes ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild erzeugt. Der zweite, kleine Hohlspiegel m wird nun so gestellt, daß dieses Bild zwischen seinen Brennpunkt und seinen Mittelpunkt fällt; hierdurch entsteht nach der vierten Hohlspiegelregel jenseits des Mittelpunktes ein abermals umgekehrtes, also aufrechtes und vergrößertes Bild ab, das nun durch eine Ocularsammellinse wie durch eine Lupe betrachtet wird und dadurch in A'B' aufrecht und nochmals vergrößert erscheint.

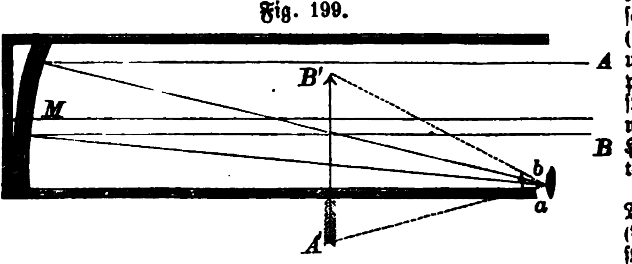
2. **Das Newton'sche (1671) Teleskop.** Newton suchte den mittleren, also den besten Theil des großen Hohlspiegels M (Fig. 198) zu behalten und ließ die von dem-

Fig. 198.



selben reflectirten Strahlen vor ihrer Vereinigung von einem unter 45° gegen die Achse geneigten Planspiegel reflectiren, wodurch sie erst in einer seitlichen Röhre ein kleines Bild ab bilden, das mittels einer Ocularlinse vergrößert wird. Cassegrain setzte in beiden Teleskopen an Stelle der kleinen Spiegel einen Convexspiegel. Die Spiegelteleskope kamen erst zu rechtem Ansehen, als Hadley (1718) u. A. den Guß und die Politur der parabolischen Hohlspiegel vervollkommneten, und als W. Herschel sie zu bedeutender Größe brachte.

Fig. 199.



4. **Herschels Teleskop** (1789). (Fig. 199.) Der Hohlspiegel M hat eine solche schiefe Lage, daß das erste Bild ab an dem unteren Rande des Rohres entsteht und dort durch eine Sammellinse in A'B' vergrößert erscheint. Das große Teleskop Herschels

hatte 5′ engl. Oeffnung und 40′ Brennweite; die Vergrößerung ging bis zu 7000, die Lichtstärke war so bedeutend, daß der Sirius mit blendendem Glanze erschien; die meisten Entdeckungen machte aber Herschel mit seinem 20füßigen Reflector. Das Riesenteleskop von Lord Rosse (1843) in Parsonstown bei Dublin (Kosten 120 000 fl.) hat 63′ Brennweite und 6′ Oeffnung; es ist von Wichtigkeit für die Auflösung der Nebelflecke gewesen. — In letzter Zeit sind Instrumente mit Hohlspiegeln wieder zur Geltung gekommen, besonders durch Foucault, der nach Steinheils Vorgang (1856) statt der Metallspiegel die versilberten gläsernen Hohlspiegel bis zu 78c Oeffnung und 2,5m Brennweite anwandte und ein total reflectirendes Prisma an die Stelle des Planspiegelchens, sonst aber Newtons Einrichtung zur Anwendung brachte. Diese versilberten Glasspiegel bieten den Vortheil eines geringeren Gewichtes, einer größeren spiegelnden Kraft, einer größeren Härte und daher vollkommeneren Politur und einer längeren Dauer; denn ein einmaliger Schliff des Glases genügt für immer, da eine Ersetzung des Silberhäutchens einer Erneuerung gleichkommt. Außerdem sind die Spiegelfernrohre gegen die Linsen dadurch im Vortheil, daß der Spiegel nur der Politur auf einer Seite bedarf, und daß die Spiegel von selbst achromatisch sind; allerdings werden alle diese Vortheile durch ihre unhandliche Größe beeinträchtigt.

366 **Der Schlierenapparat** (Töpler 1867) dient zur Wahrnehmung von Veränderungen der Dichtigkeit, der Elasticität, der Temperatur, von Bewegungen im Inneren durchsichtiger Körper, insofern dieselben eine Veränderung des Brechungsvermögens bewirken, z. B. zur Wahrnehmung von Schlieren im Glase, d. h. von Stellen, die eine andere Dichte als die übrige Glasmasse besitzen. Wenn von einer scharf abgegrenzten Lichtquelle (Illuminator) Licht auf ein Linsensystem (Kopf) fällt, so erscheint durch ein Fernrohr mit Schiebvorrichtungen (Analysator) das Gesichtsfeld der Linse hell. Wird aber der Schieber des Analysators so verschoben, daß seine Kante mit der des Illuminators zusammenfällt (empfindliche Einstellung), so erscheint das Gesichtsfeld dunkel, insofern die Linse keine Schliere enthält. Findet sich aber in der Linse eine stärker brechende Schliere oder wird zwischen den Kopf und den Analysator an irgend einer Stelle eine stärker brechende Substanz angebracht, so wird durch diese noch Licht über den Rand des Schiebers hinausgebrochen, und die Schliere erscheint hell auf dunkelm Grunde. Ist die Schliere schwächer brechend, so ist sie schon vor der empfindlichen Einstellung dunkel, während das Gesichtsfeld noch hell ist, erscheint also dunkel auf hellem Grunde.

Fig. 200.

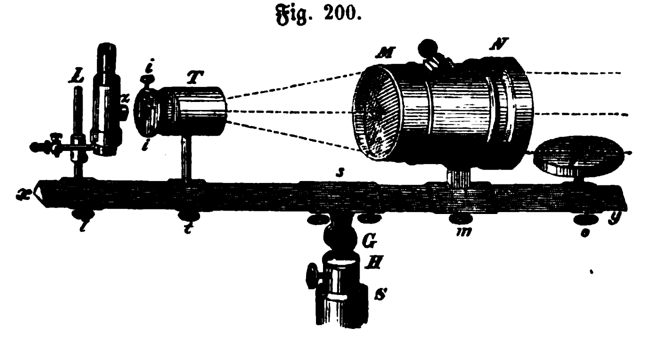
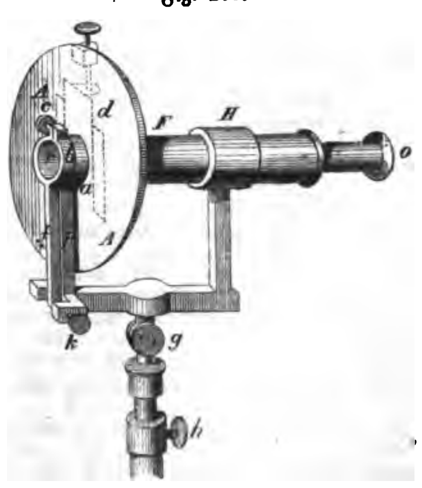


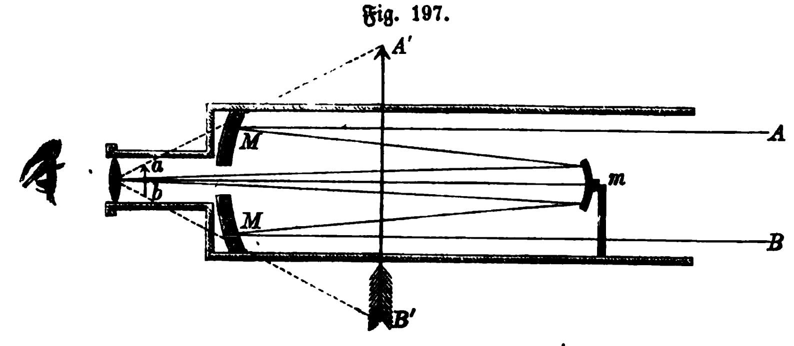
Fig. 201.



Die Einrichtung des Apparates zeigen Fig. 200 und 201. Auf einer Stahlschiene xy sitzt der Illuminator, bestehend aus einer Lampe L und dem Rohre T, dessen Spaltvorrichtung mittels des Schiebers i ein genau geradlinig begrenztes Segment als Lichtöffnung am linken Ende des Rohres übrig läßt; dann folgt der Kopf MN, bestehend aus einem achromatischen Doppelobjectiv in solcher Entfernung von i, daß i jenseits des Brennpunktes von MN liegt, und daß daher diesseits von MN in großer Entfernung ein reelles Bild der Lichtöffnung entsteht. Auf den Tisch V kommen die zu untersuchenden Gegenstände. In einer Ent-

365 b) Reflectoren. 1. Das Gregory'sche (1663) Teleskop (Fig. 197). Es besteht aus einem in der Mitte durchbrochenen großen parabolischen Hohlspiegel MM, der nach der zweiten Hohlspiegelregel von einem entfernten Gegenstande AB in

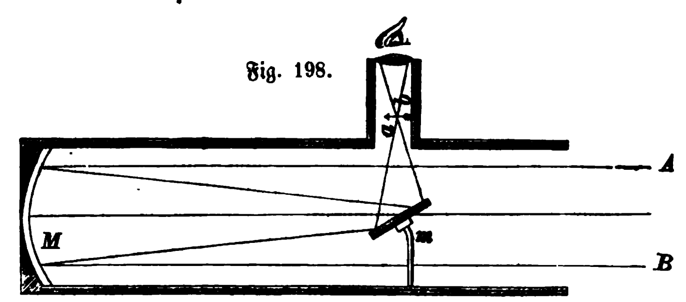
Fig. 197.



der Nähe des Brennpunktes ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild erzeugt. Der zweite, kleine Hohlspiegel m wird nun so gestellt, daß dieses Bild zwischen seinen Brennpunkt und seinen Mittelpunkt fällt; hierdurch entsteht nach der vierten Hohlspiegelregel jenseits des Mittelpunktes ein abermals umgekehrtes, also aufrechtes und vergrößertes Bild ab, das nun durch eine Ocularsammellinse wie durch eine Lupe betrachtet wird und dadurch in A'B' aufrecht und nochmals vergrößert erscheint.

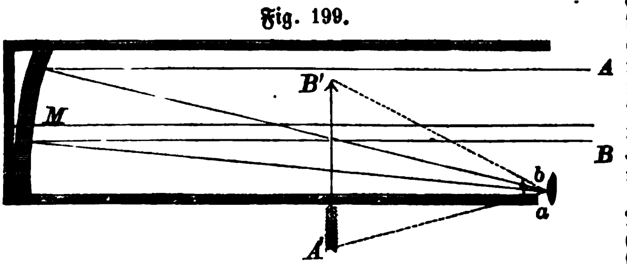
2. Das Newton'sche (1671) Teleskop. Newton suchte den mittleren, also den besten Theil des großen Hohlspiegels M (Fig. 198) zu behalten und ließ die von dem-

Fig. 198.



selben reflectirten Strahlen vor ihrer Vereinigung von einem unter 45° gegen die Achse geneigten Planspiegel reflectiren, wodurch sie erst in einer seitlichen Röhre ein kleines Bild ab bilden, das mittels einer Ocularlinse vergrößert wird. Cassegrain setzte in beiden Teleskopen an Stelle der kleinen Spiegel einen Convexspiegel. Die Spiegelteleskope kamen erst zu rechtem Ansehen, als Hadley (1718) u. A. den Guß und die Politur der parabolischen Hohlspiegel vervollkommneten, und als W. Herschel sie zu bedeutender Größe brachte.

Fig. 199.



4. Herschels Teleskop (1789). (Fig. 199.) Der Hohlspiegel M hat eine solche schiefe Lage, daß das erste Bild ab an dem unteren Rande des Rohres entsteht und dort durch eine Sammellinse in A'B' vergrößert erscheint. Das große Teleskop Herschels

hatte 5′ engl. Oeffnung und 40′ Brennweite; die Vergrößerung ging bis zu 7000, die Lichtstärke war so bedeutend, daß der Sirius mit blendendem Glanze erschien; die meisten Entdeckungen machte aber Herschel mit seinem 20füßigen Reflector. Das Riesenteleskop von Lord Rosse (1843) in Parsonstown bei Dublin (Kosten 120 000 fl.) hat 63′ Brennweite und 6′ Oeffnung; es ist von Wichtigkeit für die Auflösung der Nebelflecke gewesen. — In letzter Zeit sind Instrumente mit Hohlspiegeln wieder zur Geltung gekommen, besonders durch Foucault, der nach Steinheils Vorgang (1856) statt der Metallspiegel die versilberten gläsernen Hohlspiegel bis zu 78ᶜ Oeffnung und 2,5ᵐ Brennweite anwandte und ein total reflectirendes Prisma an die Stelle des Planspiegelchens, sonst aber Newtons Einrichtung zur Anwendung brachte. Diese versilberten Glasspiegel bieten den Vortheil eines geringeren Gewichtes, einer größeren spiegelnden Kraft, einer größeren Härte und daher vollkommeneren Politur und einer längeren Dauer; denn ein einmaliger Schliff des Glases genügt für immer, da eine Ersetzung des Silberhäutchens einer Erneuerung gleichkommt. Außerdem sind die Spiegelfernrohre gegen die Linsen dadurch im Vortheil, daß der Spiegel nur der Politur auf einer Seite bedarf, und daß die Spiegel von selbst achromatisch sind; allerdings werden alle diese Vortheile durch ihre unhandliche Größe beeinträchtigt.

366 **Der Schlierenapparat** (Töpler 1867) dient zur Wahrnehmung von Veränderungen der Dichtigkeit, der Elasticität, der Temperatur, von Bewegungen im Inneren durchsichtiger Körper, insofern dieselben eine Veränderung des Brechungsvermögens bewirken, z. B. zur Wahrnehmung von Schlieren im Glase, d. h. von Stellen, die eine andere Dichte als die übrige Glasmasse besitzen. Wenn von einer scharf abgegrenzten Lichtquelle (Illuminator) Licht auf ein Linsensystem (Kopf) fällt, so erscheint durch ein Fernrohr mit Schiebvorrichtungen (Analysator) das Gesichtsfeld der Linse hell. Wird aber der Schieber des Analysators so verschoben, daß seine Kante mit der des Illuminators zusammenfällt (empfindliche Einstellung), so erscheint das Gesichtsfeld dunkel, insofern die Linse keine Schliere enthält. Findet sich aber in der Linse eine stärker brechende Schliere oder wird zwischen den Kopf und den Analysator an irgend einer Stelle eine stärker brechende Substanz angebracht, so wird durch diese noch Licht über den Rand des Schiebers hinausgebrochen, und die Schliere erscheint hell auf dunkelm Grunde. Ist die Schliere schwächer brechend, so ist sie schon vor der empfindlichen Einstellung dunkel, während das Gesichtsfeld noch hell ist, erscheint also dunkel auf hellem Grunde.

Fig. 200.

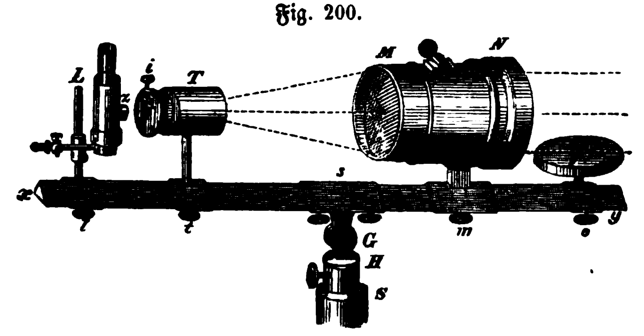
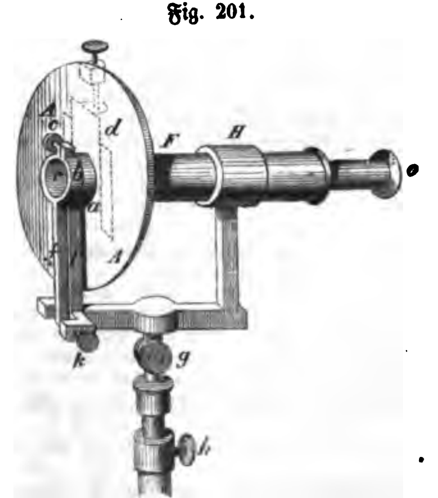


Fig. 201.



Die Einrichtung des Apparates zeigen Fig. 200 und 201. Auf einer Stahlschiene xy sitzt der Illuminator, bestehend aus einer Lampe L und dem Rohre T, dessen Spaltvorrichtung mittels des Schiebers i ein genau geradlinig begrenztes Segment als Lichtöffnung am linken Ende des Rohres übrig läßt; dann folgt der Kopf MN, bestehend aus einem achromatischen Doppelobjectiv in solcher Entfernung von i, daß i jenseits des Brennpunktes von MN liegt, und daß daher diesseits von MN in großer Entfernung ein reelles Bild der Lichtöffnung entsteht. Auf den Tisch V kommen die zu untersuchenden Gegenstände. In einer Ent-

fernung von 10—20′ steht der Analysator (Fig. 201), bestehend aus einem astronomischen Fernrohre Fo von 15facher Vergrößerung und der Metallscheibe A, vorn mit einem Tubus r, hinten mit einem Diaphragma d, dessen untere geradlinige Kante von der kreisförmigen Oeffnung ein Segment abschneidet. Um die empfindliche Einstellung zu erreichen, muß zunächst das Bild der Lichtöffnung so in den Tubus r gebracht werden, daß die gerade Grenzlinie derselben parallel zu der geraden Grenzkante des Diaphragmas central durch den Tubus geht; dann wird die letztere Kante so lange durch die Schraube bei d verschoben, bis sie mit der ersteren zusammenfällt; dies ist die empfindliche Einstellung. Man kann mit diesem Apparate nicht blos Schlieren entdecken, sondern vieles sonst Unsichtbare sehen: 1. Die Diffusion von Aether in Wasser und die Aetherdämpfe in der Luft. 2. Das Fallen eines Wassertropfens durch Wasser bis auf den Boden herab. 3. Wasserströmungen in gleich hoch gefüllten, durch eine Röhre verbundenen Gefäßen. 4. Die Schallwellen des elektrischen Funkens. 5. Die reflectirte Welle ist gleich der einfallenden. 6. Die gebrochene Welle in dichterem Medium ist kleiner, in dünnerem größer, als in dem früheren Medium. 7. Die ungestörte Interferenz der Wellen. 8. Der elektrische Funke ist ein Luft aus einander stoßender Impuls; das sofortige Wiederzusammenschlagen der Luft ist durch die Wärme verhindert. 9. Zwischen dem Schallfunken und dem Entladungsfunken verfließt eine gewisse Zeit, ohne Flasche 0,0000015 Sec., mit Flasche 0,000018 bis 0,000135 Sec., woraus folgt, daß die Entladung einer Flasche mehr Zeit braucht.

367 **Aufg.** 548. Wie groß ist die Wellenlänge der Fraunhofer'schen Linien in Wasser? Aufl.: A = 7601 . $^3/_4$ = 5701, B = 5152, C = 5037, D = 4325, E = 3952, F = 3646, G = 3231, H = 2976 Zehnmilliontel Millim. — A. 549. Der B.-E. von B ist im Flintglas = 1,627, von H = 1,671; wie groß sind ihre Wellenlängen? Aufl.: 4222, 2439. — A. 550. Die Wellenlänge von B ist in Crownglas 4501; wie groß ist der B.-E. dieses Glases für B? Aufl.: 1,526. — A. 551. Der brechende Winkel eines Flintglasprismas sei 35°, das Minimum der Ablenkung für die 3 Linien D, F und G = 21° 34′ 30″, 21° 59′ 30″, 22° 20′ 10″; wie groß sind die B.-E. der 3 Linien? Aufl.: Nach 301. ist n für D = 1,576, für F = 1,5865, für G = 1,5953. — A. 552. Läßt man ein Bündel Sonnenstrahlen auf ein gleichseitiges Prisma in $^1/_2$ der Höhe einer Seitenfläche so einfallen, daß der Strahl im Prisma zu einer zweiten Seitenfläche parallel läuft, welche Erscheinung tritt dann ein? Aufl.: Aus jeder Seitenfläche tritt ein weißes und ein spectrales Bündel heraus wegen der Brechung und der Reflexion an jeder Fläche; durch Zeichnung zu finden. — A. 553. Auf ein Crownglasprisma von 30° trifft unter dem Einfallswinkel 30° ein weißes Strahlenbündel; die B.-E. von Roth und Violett seien 1,526 und 1,547; wie groß sind die Austrittswinkel und wie groß die totale Dispersion? Aufl.: 16° 43′ 30″ und 17° 22′ 56″; Dispersion = 39′ 26″. — A. 554. Wie lang ist das Spectrum auf einer 90^cm^ entfernten Wand? Aufl.: 2 . 90 sin 19′ 43″ = 1,124^cm^. — A. 555. Für ein Flintglasprisma von 30° sind die B.-E. der rothen und violetten Strahlen 1,6 und 1,64; der Einfallswinkel ist 90°; wie groß ist die Dispersion? Aufl.: 1° 57′ 17″. — A. 556. Wie lang ist das Spectrum auf einem 2^m^ entfernten Schirme? Aufl.: 6,82^cm^. — A. 557. Wie erscheint auf dunkelm Grunde ein weißer Punkt, eine weiße Linie, ein weißes Rechteck durch ein Prisma, dessen brechende Kante der Linie parallel und in einem zweiten Falle zu derselben senkrecht steht; wie erscheint ein dunkler Punkt, eine dunkle Linie, ein dunkles Rechteck auf weißem Grunde, nebst Begründung? — A. 558. Was würde es bedeuten, wenn in einem Sonnenspectrum die Linie D plötzlich hell aufblitzen würde? Aufl.: Eine Eruption von glühendem Natriumdampf; Erklärung. — A. 559. Was würde im Sonnenspectrum das Verschwinden der dunkeln D-Linie bedeuten? Aufl.: Das Verschwinden des Natriums aus der Sonnenhülle; Erkl. — A. 560. Was würde das Breiterwerden und das Dunklerwerden der D-Linie bedeuten? Aufl.: Eine Vermehrung und eine Abkühlung des Na-Dampfes; Erkl. — A. 561. Wüllner nahm 1868 in einer Geißler'schen Röhre, durch die er mit Hilfe der Holtz'schen Elektrisirmaschine einen Funkenstrom der Leydner Flasche schickte, in dem entstehenden continuirlichen Spectrum eine dunkle D-Linie wahr; wie ist dies zu erklären? Aufl.: Die glühende Glaswand gab das continuirliche Spectrum und in die Röhre verdampftes Natrium die dunkle Linie. — A. 562. Was würde eine Verschiebung von D im Sonnenspectrum nach dem Roth hin anzeigen? Aufl.: Das Sinken des Natriumdampfes in der Sonnenhülle. — A. 563. Wie groß ist die Dispersion eines unter kleinem Winkel α aus Glas in die Luft übergehenden Strahles, wenn die B.-E. des rothen und violetten Strahles = n_r und n_v sind? Aufl.: Weil α sehr klein, so ist $\beta_r = n_r \cdot \alpha$ und $\beta_v = n_v \cdot \alpha$; also ist die Dispersion $= \alpha(n_v - n_r)$. — A. 564. Wie groß ist die Ablenkung des mittleren oder gelben Strahles? Aufl.: $\beta = n\alpha$; daher die Abl. $\beta - \alpha = \alpha(n - 1)$. — A. 565. Warum wird der Quotient $(n_v - n_r) : (n - 1)$ Zerstreuungsvermögen genannt (s. S. 343 u. 328)? Aufl.: Nach A. 563 und 564 gibt dieser Ausdruck das constante Verhältniß der mittleren Ablenkung zur Dispersion an. — A. 566.

Wie groß ist das Zerstreuungsvermögen des Flintglases in A. 555, wenn der mittlere B.-E. 1,62 ist? Aufl.: 0,064; für Crownglas 0,033, Wasser 0,035, Bergkrystall 0,026, Diamant 0,038. — A. 567. Wie groß ist die Dispersion durch ein Prisma unter Voraussetzung eines kleinen brechenden Winkels B und eines kleinen Einfallswinkels α? Aufl.: $(n_v - n_r)\,B$. — A. 568. Wie groß ist die Dispersion eines Diamantprismas von 10° br. W.? Aufl.: $(n_v - n_r) = 0{,}038 \,.\, (n - 1) = 0{,}056$; daher die Dispersion $= 0{,}56°$. — A. 569. Einen allgemeinen Ausdruck für die Dispersion durch ein Prisma aufzufinden, wenn α und B nicht sehr klein sind? Aufl.: Fig. 167 S. 323 ergibt $\sin \alpha'_v = \sin B \sqrt{(n_v^2 - \sin^2\alpha_v)} - \cos B \sin \alpha_v$; ebenso findet man auch $\sin \alpha'_r = \sin B \sqrt{(n_r^2 - \sin^2\alpha_r)} - \cos B \sin \alpha_r$; die Dispersion ist dann $\alpha'_v - \alpha'_r$. — A. 570. Wie groß ist der brechende Winkel B′ des Flintglasprismas, welches das Crownglasprisma in A. 569 zu achromatisiren vermag; sämmtliche Zeichen der A. 569 gelten auch für das Flintglasprisma, nur aus dem großen Alphabet? Aufl.: Es muß sein $A'_v = A'_r$, also auch $\sin A'_v = \sin A'_r$, also auch $\sin B' \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 A_r)} - \cos B' \sin A_r = \sin B' \sqrt{(N_v^2 - \sin^2 A_v)} - \cos B' \sin A_v$ oder $\tan B' \{\sqrt{(N_v^2 - \sin^2 A_v)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 A_r)}\} = \sin A_v - \sin A_r$. Nun sind aber A_v und A_r, die Einfallswinkel des zweiten Prismas, bei der achromatischen Zusammensetzung gleich den Austrittswinkeln α'_v und α'_r des ersten Prismas, für deren Sinusse A. 569 die Werthe enthält; setzen wir dieselbe in die letzte Gleichung ein, so entsteht

$$\tan B' \{\sqrt{(N_v^2 - \sin^2 A_v)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 A_r)}\} = \sin B \{\sqrt{(n_v^2 - \sin^2\alpha_v)} - \sqrt{(n_r^2 - \sin^2\alpha_r)}\},$$

woraus endlich $\tan B' = \dfrac{\sqrt{(n_v^2 - \sin^2\alpha)} - \sqrt{(n_r^2 - \sin^2\alpha)}}{\sqrt{(N_v^2 - \sin^2 A_v)} - \sqrt{(N_r^2 - \sin^2 A_r)}} \cdot \sin B$

da nämlich α_v und α_r, die Einfallswinkel der rothen und der violetten Strahlen mit α, dem Einfallswinkel des Strahles überhaupt einerlei sind; A_v und A_r fallen ebenso mit α'_v und α'_r in A. 569 zusammen. — A. 571. Ist z. B. $n_v = 1{,}55$, $n_r = 1{,}53$, $N_v = 1{,}67$, $N_r = 1{,}63$, $B = 50°$ und $\alpha = A = 50°$, wie groß ist dann der brechende Winkel des achromatisirenden Flintglasprismas? Aufl.: $B' = 29°\ 17'$. — A. 572. Auf eine biconvexe Flintglaslinse von 40cm Radius fällt von einem 50cm entfernten Punkte weißes Licht; wo sind die Vereinigungspunkte der rothen und der violetten Strahlen; B.-E. in A. 571? Aufl.: Nach Fl. (42) $b_r = 87^{cm}$, $b_v = 74^{cm}$. — A. 573. Bei einer achromatischen Linsencombination muß sich die Brennweite der convexen Crownglaslinse zur Zerstreuungsweite der concaven Flintglaslinse wie die Dispersionsvermögen der beiden Substanzen verhalten; diesen Satz zu beweisen? And.: Seien die beiden Brennweiten f′ und f″, so ist zunächst zu zeigen, daß die Brennweite der Linsenverbindung $f = f' f'' : (f'' - f')$ oder $1/f = 1/f' - 1/f''$. Setzt man nun für diese f′ und f″ die Werthe aus 303. sowohl für die rothen, wie auch für die violetten Strahlen, und bedenkt, daß $1/f$ wegen des Achromatismus für beide Farben denselben Werth haben muß, so ergibt sich die verlangte Proportion. — A. 574. Der Durchmesser eines Objectes sei d, der Abstand vom Auge $= a$, der Abstand des Kreuzungspunktes von der Hornhaut $= b$, von der Netzhaut $= c$; wie groß ist der Gesichtswinkel und der Durchmesser des Netzhautbildchens? Aufl.: $\sin \alpha/_2 = d : 2(a + b)$; $x = cd : (a + b)$. — A. 575. Wie groß sind Sehwinkel und Netzhautbildchen, wenn $a = 120^{cm}$, $d = 4^{cm}$, $b = 10^{mm}$, $c = 14^{mm}$? Aufl.: $\alpha = 1°\ 53'\ 38''$, $x = 0{,}46^{mm}$. — A. 576. Wenn das kleinste, bei mäßiger Beleuchtung sichtbare Netzhautbildchen gerade einen Zapfen des gelben Flecks (Durchmesser nach neuesten Messungen von Max Schultze $= 0{,}0025^{mm}$) ganz ausfüllen muß, wie viel mal weiter darf dann ein Gegenstand entfernt sein, als er groß ist? Aufl.: 5600. — A. 577. In welcher Entfernung würde dann ein Spinnenfaden $d = 1/_{500}{}^{mm}$ verschwinden? Aufl.: 11mm. — A. 578. Wie weit wäre ein Mensch, Größe 1,6m, sichtbar? Aufl.: 8960m. — A. 579. Wie groß müssen die kleinsten auf dem Monde für uns sichtbaren Gegenstände sein? Aufl.: 9 M. — 580. Wie groß ist der Sehwinkel eines dunkeln Fadens von 0,002mm Durchmesser, den man in 20cm Entf. noch sieht? Aufl.: 9″. — A. 581. Warum sieht man durch eine feine Oeffnung einen ganz nahen Gegenstand deutlicher als direct? Aufl.: Wegen der Verkleinerung des Zerstreuungskreises; Erkl. — A. 582. Warum sieht man mit einem Auge durch 2 Oeffnungen einen sehr nahen Gegenstand doppelt? Aufl.: Weil derselbe diesseits des Nähepunktes liegt; Erkl. — A. 583. In welcher Entf. sieht man ihn zuerst einfach? Aufl.: Im Nähepunkt, 4—5″. — A. 584. Wo sieht man ihn ohne Anstrengung einfach, scharf und deutlich? Aufl.: In der deutlichen Sehweite 25cm. — A. 585. Für ein hypermetropisches Auge, dessen Nähepunkt 20″ ist, soll eine Convexbrille gesucht werden, die die Gegenstände in einer Entfernung von 10″ sichtbar macht? Aufl.: Bei Vernachlässigung des Brillenabstandes vom Auge ist $1/_{10} - 1/_{20} = 1/f$; hieraus $f = 20''$. — A. 586. Für ein brachymetropisches Auge, dessen Fernepunkt 30″ ist, soll eine Concavbrille gefunden werden, durch die es 50″ weite Gegenstände sehen kann? Aufl.: $1/_{30} - 1/_{50} = 1/f$; hieraus $f = 75''$. — A. 587. Wenn allgemein der Nähepunkt $= b$, d die Gegenstandsweite, a der Abstand der Brille vom Auge, wie groß ist dann f? Aufl.: $f = [db - a(d + b) + a^2] : (b - d)$;

bei Vernachlässigung von a ist $f = db : (b - d)$. — A. 588. Welche Vergrößerung gibt eine Lupe von 8^{mm} Brennweite, wenn die deutliche Sehweite 25^{cm} beträgt? Aufl.: 32. — A. 589. Welche Vergrößerung gibt eine Lupe von 2″ Brennweite einem myopischen Auge, dessen deutliche Sehweite 4″ beträgt, und einem presbyopischen, dessen Sehweite = 30″? Aufl.: 3 und 16. — A. 590. Wie groß ist die Brennweite einer Lupe, die einem emmetropischen Auge eine 80fache Vergrößerung gibt? Aufl.: $3{,}16^{mm}$. — A. 591. Die 2 Gläser einer Doppellupe haben die Entfernung m und die Brennweiten f' und f''; wie groß ist die Brennweite der Verbindung? Aufl.: $f = f'(f'' - m) : (f' + f'' - m)$. — A. 592. Wie groß ist die Brennweite, wenn sich die 2 Linsen berühren? Aufl.: $f = f'f'' : (f' + f'')$. — A. 593. Welche Vergrößerung gibt eine Doppellupe, deren Linsen 5 und 8″ Brennweite haben und sich berühren? Aufl.: 3,6. — A. 594. Welche Brille muß ein Taucher aufsetzen, um in Wasser in 10″ = $26{,}2^{cm}$ Entfernung vom Auge oder in $25{,}2^{cm}$ Entfernung von der Brille deutlich zu sehen, wenn die deutliche Sehweite d in der Luft = 27^{cm}, der Radius der Cornea $\varrho = 0{,}8^{cm}$, n und n′ die Brechungsexponenten von Luft und Wasser gegen die Cornea, also $n' : n$ der B.-E. des Wassers gegen die Luft = $^3/_4$? Aufl.: Ein Punkt im Wasser, der ebenso deutlich gesehen werden soll, als ein Punkt von der Entfernung d in der Luft, muß nach dem Linsengesetze die Entfernung haben $d' = d\varrho : \{(n' : n)\,\varrho + [(n' : n) - 1]\,d\}$. Durch Einsetzung der Zahlen ergibt sich $d' = -3{,}5$, d. h. im Wasser sieht das Auge deutlich, wenn die Strahlen nach einem Punkte $3{,}5^{cm}$ hinter der Hornhaut convergiren. Die gesuchte Brille muß also das Bild eines $25{,}2^{cm}$ entfernten Punktes in die Entfernung $-4{,}5^{cm}$ von der Brille rücken, d. h. sie muß eine Convexbrille sein, deren Radius r wir nach der Formel finden $^1/b + ^1/d = 2(n - 1) : r$, worin $b = 4{,}5$, $d = 25{,}2$ und $n = ^3/_2 : ^4/_3 = ^9/_8$ ist; hieraus ergibt sich $r = 0{,}95^{cm} = 0{,}36''$. — A. 595. Welches ist die Vergrößerung eines Mikroskops, wenn die Brennweiten f' und f'', b die Weite des deutlichen Sehens und d die Objectdistanz vom Objectiv ist? Aufl.: Die Vergrößerung durch das Objectiv ist $f' : (d - f')$, die durch das Ocular $(b + f'') : f''$; folglich die Gesammtvergrößerung $f'(b + f'') : (d - f')\,f''$. — A. 596. Welches ist die Vergrößerung eines Mikroskops, wenn $f' = 0{,}2''$, $f'' = 1''$, $b = 10''$ und $d = 0{,}201''$? Aufl.: 2200. — A. 597. Welches sind Vergrößerung, Länge und Gesichtsfeld eines Galilei'schen Fernrohres, dessen Obj. 18^{cm} und dessen Ocular 2^{cm} Brennweite hat? Aufl.: 9, 16^{cm} und 64′ 26″; der Durchmesser der Pupille wird hierbei 3^{mm} gesetzt; dann ist die Tangente des halben Gesichtsfeldes = $0{,}5 \,.\, 0{,}3 : (18 - 2)$. — A. 598. Vergrößerung, Länge und Gesichtsfeld eines astronomischen Fernrohres zu bestimmen, dessen Objectiv 4^m und dessen Ocular 2^{cm} Brennweite hat? Aufl.: 200, $4{,}02^m$ und 10′ 14″, wenn der Durchmesser des Oculars 0,6 von seiner Brennweite genommen wird.

8. Die Lehre von der Interferenz und der Polarisation des Lichtes.

Theoretische Optik.

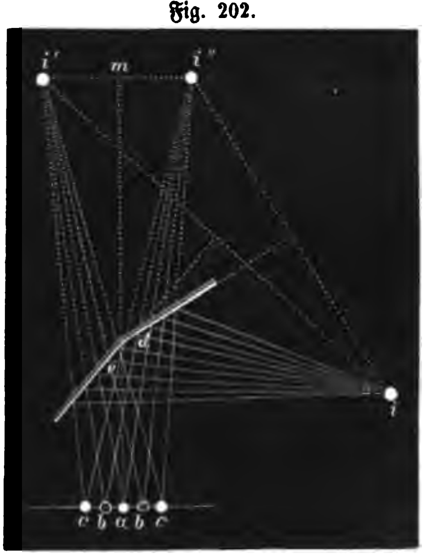
368 **1. Die Interferenz des Lichtes.** (Grimaldi 1665, Young 1801).

Die specielle Interferenz des Lichtes umfaßt solche Erscheinungen, in welchen beim Zusammentreffen mehrerer Lichtstrahlen an einzelnen Stellen Aufhebung oder Schwächung, an anderen Verstärkung der Lichtintensität wahrgenommen wird. Eine solche kann nur stattfinden, wenn die Strahlen auf einander fallen oder parallel oder nur sehr wenig gegen einander geneigt neben einander laufen (s. 226., 227. und 228.), und wenn die Schwingungsrichtungen einander ganz oder nahezu parallel sind. Wo die Phasendifferenz der Strahlen eine gerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, findet Verstärkung der Lichtintensität statt; denn alsdann fallen die Ausgangspunkte zweier Wellenstrahlen zusammen, oder sie sind um 1, 2, 3 . . . Wellenlängen von einander entfernt, und deßhalb erhalten alle Atome durch die eine Welle dieselbe Bewegungsart wie durch die andere, und erfahren hierdurch eine Verstärkung ihrer Bewegung. Wo die Phasendifferenz eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, findet Schwächung oder bei gleich starker Bewegung Aufhebung der Lichtintensität statt; denn alsdann sind die Ausgangspunkte zweier Wellenstrahlen um $^1/_2$, $^3/_2$, $^5/_2$ . . . . Wellenlängen von einander entfernt, die zweite Hälfte der ersten Welle fällt auf die erste Hälfte der zweiten, Berg und

Thal decken sich und deshalb erhalten alle Atome durch die eine Welle die entgegengesetzte Bewegung wie durch die andere, und erfahren hierdurch eine Schwächung oder Aufhebung ihrer Bewegung. Diese Sätze wurden schon in 226. mathematisch bewiesen. Natürlich gelten sie nur für Wellen von gleicher Länge, also für homogene Strahlen von derselben Farbe.

Grimaldis Interferenzversuch war folgender: Er ließ durch 2 äußerst nahe beisammen liegende Oeffnungen in einem Fensterladen Licht in ein finsteres Zimmer dringen und fing die Strahlenbündel mit einem Schirme auf; es entstanden die bekannten 2 Sonnenbilder, die theilweise auf einander fielen. Statt aber an der Deckungsstelle überall eine größere Helligkeit zu zeigen, erschienen hier abwechselnd dunkle und helle Streifen. Erst 1802 gelang es Young, diese durch Interferenz der Lichtwellen zu erklären. Fresnel (1820) gab neue bestätigende Versuche. In seinem berühmten Spiegelversuche ließ er ein schmales homogenes Lichtbündel von zwei unter nahezu 180° gegen einander geneigten Metallspiegeln oder geschwärzten Glasspiegeln reflectiren und zwar nahe an der Kante; die zurückgeworfenen Strahlenbündel wichen nur äußerst wenig in der Richtung von einander ab und lagen direct neben einander. Ließ er sie auf einen Schirm fallen, so zeigten sich zwischen beiden Bildern abwechselnd helle und dunkle Streifen, die bei der Bedeckung des einen Spiegels sofort verschwanden. Fresnel wandte homogenes Licht von allen Spectralfarben an und fand die Interferenzstreifen von verschiedener Breite, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Dies erklärte er durch die verschiedene Wellenlänge der verschiedenen Farben; die Mitte a (Fig. 202) zwischen den beiden Bildern empfängt von den Spiegeln die reflectirten Lichtstrahlen da und ea, welche mit ihren einfallenden Strahlen di und ei die Strahlenwege adi und aei ausmachen; diese Strahlenwege sind einander gleich, weil sie gleich den Entfernungen des Punktes a von den beiden Spiegelbildern i′ und i″ sind und weil diese Entfernungen ai′ und ai″ gleiche Längen haben. Es haben demnach die Strahlen keinen Gangunterschied, sie verstärken sich daher: in der Mitte zwischen den beiden Bildern ist es hell. Dagegen für den Punkt b sind die beiden Strahlen i′b und i″b nicht einander gleich; beträgt ihr Unterschied eine halbe Wellenlänge des angewendeten homogenen Lichtes, so heben sie sich auf, bei b muß Dunkelheit stattfinden. Für den Punkt c ist der Gangunterschied der Strahlen i′c und i″c noch mehr gewachsen; beträgt er hier eine Wellenlänge, so verstärken sich die Strahlen, bei c findet Helligkeit statt u. s. w.; die Größe von ac, also auch die Breite der hellen und dunkeln Streifen hängt offenbar von der Wellenlänge des Lichtes ab; der Unterschied der Strahlen wird von a nach b hin um so eher eine halbe Wellenlänge sein, je kleiner die Wellenlänge des Lichtes ist; das dunkle b wird um so näher an a liegen, je kleiner die Wellenlänge ist, die violetten Streifen sind schmäler als die rothen, und zwar ist die Streifenbreite der Wellenlänge direct proportional, und um so kleiner, je stumpfer der Neigungswinkel der Spiegel ist, wie folgender Beweis ergibt: Sei der Gangunterschied der Strahlen $= d$ und l die Wellenlänge, so muß die Beziehung $d = \frac{1}{2} . nl$ für die Interferenz bestehen, wobei n für die dunkeln Streifen eine ungerade, für die hellen eine gerade Zahl sein muß. Ist weiter $i'i'' = x$, $am = y$ und ab, die Breite eines Streifens, $= \beta$, so ist $i'b = \sqrt{[y^2 + (\frac{1}{2}x - \beta)^2]}$ und $= i''b \sqrt{(y^2 + (\frac{1}{2}x + \beta)^2]}$. Entwickelt man die beiden Wurzeln und vernachlässigt wegen der Kleinheit von β und x die höheren Potenzen dieser Größen, so ergibt sich $d = i''b - i'b = x\beta : y$. Setzt man die beiden Werthe von d einander gleich, so folgt $\beta = \frac{1}{2}n . ly : x$, worin $\frac{1}{2}n$ wegzufallen hat, wenn es sich um die Entfernung zweier benachbarten Streifen von einander handelt, weil hier die Anzahl der halben Wellenlängen $= 1$ ist; folglich ist $\beta = ly : x$. Wenn hiernach die Streifenbreite direct proportional der Wellenlänge ist, so verhält sich die Breite der Streifen im homogenen rothen Licht zu der des homogenen violetten Lichtes wie 76 zu 40. Bei Anwendung

Fig. 202.



von weißem Lichte fallen in der Mitte a Streifen von allen Farben auf einander; es entsteht also eine weiße Mitte; da jedoch die gelben und rothen Streifen breiter sind als die blauen, so hat die weiße Mitte gelbrothe Ränder. Wo das Roth zu Ende ist, taucht das Violett noch nicht wieder auf; denn wenn das Roth in dem Abstande 38 von der Mitte aufhört, erscheint das Violett zuerst in dem der doppelten halben Wellenlänge entsprechenden Abstande 2 . 20 = 40 wieder; daher folgt nach dem Roth ein dunkler Streifen, der indeß rasch diesem neuen Violett weichen muß. Auf dessen Fortsetzung legt sich zunächst Blau, dann die übrigen Farben, wodurch zum zweiten Male Weiß entsteht, das demnach einerseits einen blauvioletten, anderseits abermals einen gelbrothen Rand besitzt u. s. w. So erklärt sich der Grimaldi'sche Interferenzversuch, sowie die farbigen Interferenzfranzen Fresnels. Ohm (1840) hat dieselben auch mittels Brechung durch ein sehr stumpfwinkeliges Interferenzprisma hervorgebracht, und Fizeau (1851) durch 2 aus einander gerückte Linsenhälften.

Aus der Gleichung $\beta = ly : x$ ergibt sich $l = \beta x : y$. Kennt man also die Breite der Streifen, die man mittels besonderer Vorrichtungen messen kann, sodann den Abstand x der beiden Bilder und den Abstand y des Schirmes, so läßt sich die Wellenlänge l des betreffenden homogenen Lichtes berechnen. Dies ist die erste Methode zur Bestimmung der Wellenlängen der verschiedenen Farben und hieraus mittels der Formel $n = c : l$ der oft angeführten großen Schwingungszahlen.

Was bei der Interferenz aus dem aufgehobenen Lichte wird, ist noch nicht erforscht; wahrscheinlich wird es in Wärme, vielleicht auch in chemische Strahlen umgewandelt. — Wrede erklärte (1835) die Absorption durch Interferenz, eine Erklärung, die indeß derjenigen durch Uebertragung der Aetherschwingungen an die Körpermoleküle weichen mußte. Zu den Interferenzen gehören auch die Schillerfarben, wie z. B. die der Perlmutter und die der Irisknöpfe. Schillernde Körper haben eine äußerst fein geriefte Oberfläche. Die auftreffenden Lichtstrahlen werden nun sowohl von den Riefen wie von den Rinnen reflectirt; die von den letzteren reflectirten Strahlen sind in der Phase gegen die ersteren zurück; diejenige Farbe, für welche der Phasenunterschied gerade ½ Wellenlänge beträgt, wird aufgehoben, andere werden verstärkt; die Folge ist, daß weißes Licht farbig zurückgeworfen wird. Verändert man die Richtung der schillernden Oberfläche, so ändert sich auch die Richtung der reflectirten Strahlen, sie können jetzt schiefer oder weniger schief gegen die Oberfläche stehen; folglich wird der Wegüberschuß des Rinnenstrahles gegen den Riefenstrahl vergrößert oder verkleinert, er wird jetzt gleich ½ Wellenlänge einer anderen Farbe sein, andere Farben als vorher werden aufgehoben und ebenso andere verstärkt; folglich muß eine Farbenänderung eintreten. Als Brewster Perlmutter in Siegellack abdrückte, zeigte dessen Oberfläche einen Perlmutterschiller. Die Irisknöpfe enthalten feine Riefensysteme von verschiedenen Richtungen, geben daher verschiedene Farben.

369 **Die Farben dünner Blättchen** (Hooke 1665). Newtons Farbenringe (Newton 1673). Alle durchsichtigen Körper erscheinen im reflectirten und im durchgelassenen Lichte farbig, wenn sie hinreichend dünne Schichten bilden; die Farben ändern sich mit der Dicke der Schichten. Am bekanntesten sind die Erscheinungen an Seifenblasen, an dünnen Oelschichten, die sich auf Wasser ausbreiten, an alten Fensterscheiben, an den Oxydrinden der Metalle, wie z. B. am angelaufenen Stahl, an bis zum Zerspringen aufgeblasenen Glaskugeln, an der Haut, die schmutziges Wasser überzieht, an Sprüngen in Glas und Krystallen, die dünne Luftschichten bilden. Newton erhielt die Lamellenfarben in Form von Ringen, indem er auf eine ebene Glastafel eine Linse von sehr schwacher Krümmung (40—60′ Radius) legte und dadurch eine allmälig nach außen dicker werdende, sehr dünne, ringförmige Luftschicht bildete. Wendet man bei diesem Newton'schen Versuche homogenes Licht an, so erhält man abwechselnd farbige und dunkle Ringe, die einen dunkeln Fleck umschließen. Diese hellen und dunkeln Ringe sind einander an Breite gleich, wenn das auf die ebene Glastafel gelegte Glasstück nicht gekrümmt ist, sondern von dem Berührungspunkte an geradlinig sich erhebt, wenn also die Dicke der Luftschicht proportional zu der Entfernung vom Berührungspunkte zunimmt; ist das Glasstück gekrümmt, so nehmen die Ringe an Breite immer mehr ab. Die Dicken der Luftschicht stehen an den hellen Stellen im Verhältnisse von 1 : 3 : 5 : 7 ..., an den dunkeln Ringen im Verhältnisse von 0 : 2 : 4 ....; die Durchmesser der hellen Ringe verhalten sich wie die Quadratwurzeln der ungeraden, die der dunkeln Ringe

wie die Quadratwurzeln der geraden Zahlen; auch nehmen die Ringdurchmesser mit der Schiefe des Sehens zu, sind also bei senkrechtem Beschauen am kleinsten. Bei verschiedenem homogenem Lichte sind die Breiten der hellen Ringe verschieden, für rothes Licht am breitesten, für violettes am schmälsten. Bei heterogenem Lichte erscheint der dunkle Fleck von verschiedenfarbigen Ringen umgeben, welche durch dunkle Ringe von einander getrennt sind. Die Farben erster Ordnung zwischen dem dunkeln Flecke und dem ersten dunkeln Ringe sind: Bläulichweiß, Gelblichweiß, Roth; die 2ter Ordnung Violett, Blau, Gelb, Roth; die 3ter Ordnung Purpur, Blau, Grün, Dunkelroth.

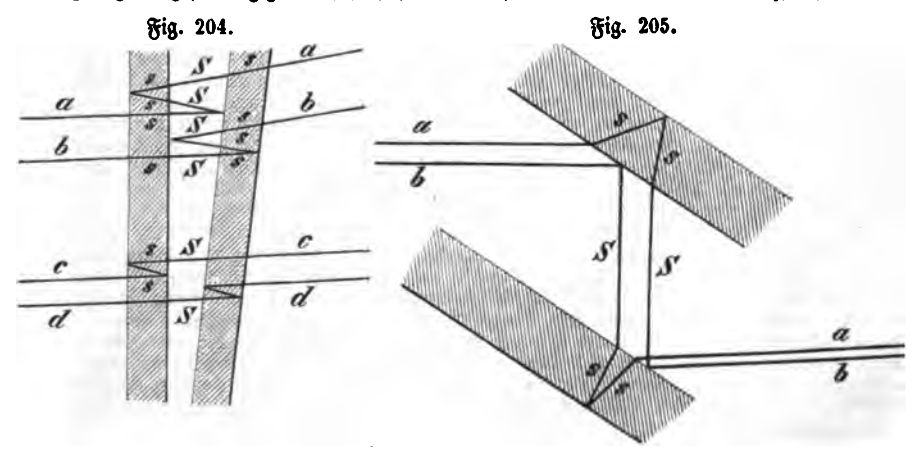
Young gab die Erklärung dieser Erscheinungen nach der Wellentheorie. Die auf das dünne Blättchen treffenden Lichtstrahlen werden an der oberen und an der unteren Fläche desselben reflectirt; die von beiden Flächen reflectirten Strahlen, welche auf einander oder direct neben einander fallen, müssen sich durch Interferenz bald aufheben, bald verstärken, je nachdem die von der unteren Fläche reflectirten Strahlen mit den oberen in gleicher oder entgegengesetzter Phase sind, was von der Dicke der Schicht abhängt. Hierbei ist aber noch zu beachten, daß die eine Reflexion an einem festen Körper, die andere an Luft stattfindet, daß also bei der ersten Reflexion das neue Medium dichter als das alte ist, und daß deßhalb nach 231. die reflectirte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, was bei der Reflexion an Luft nicht stattfindet. Wo sich die Platte und die Linse direct berühren, in a (Fig. 203) wird Licht an der Unterfläche bc der Linse d. i. an Luft reflectirt, aber auch an der Oberfläche de der Platte, also an Glas. Obwohl nun die Ausgangspunkte der beiden reflectirten Strahlen (in a) zusammenfallen, so ist doch der letztere Strahl gegen den ersteren um eine halbe Wellenlänge zurück, weil der letztere bei der Reflexion um eine halbe Wellenlänge verschoben ist, der erstere aber nicht; folglich müssen sich an der Berührungsstelle die beiden Strahlen einander aufheben: es muß ein dunkler Fleck bei a entstehen. Wenn aber bei f die Dicke der Luftschicht fh oder die Entfernung der beiden reflectirenden Flächen von einander ¼ der Wellenlänge z. B. des rothen Lichtes beträgt, so muß der Strahl, der an der unteren Fläche reflectirt wird, den Weg fh zweimal zurücklegen, um wieder mit dem Strahl gh zusammenzutreffen; er ist deßhalb um ½ Wellenlänge von gh verschieden, und da er wegen Reflexion an einem dichteren Medium um noch ½ Wellenlänge verschieden ist, so beträgt sein totaler Phasenunterschied eine ganze Wellenlänge: der Strahl fh muß hg verstärken, es muß hier Helligkeit stattfinden. Dasselbe wird der Fall sein, wo die Dicke der Schicht ¾, 5/4, 7/4 . . . einer Wellenlänge beträgt; daher verhalten sich die Dicken der Schichten an den hellen Stellen wie die ungeraden Zahlen, und die Durchmesser der hellen Ringe wie die Wurzeln aus den ungeraden Zahlen. Wenn weiter bei i die Dicke der Luftschicht 2/4 Wellenlänge beträgt, so wird der an der Unterfläche reflectirte Strahl um $4/4 = 1$ Wellenlänge gegen den oberen zurück sein wegen des zweimal durchlaufenen Weges ik; außerdem ist er wegen Reflexion an einem dichteren Medium um noch ½ Wellenlänge verschieden; der totale Phasenunterschied beträgt daher 3/2 Wellenlängen, es findet hier Lichtaufhebung statt. Dasselbe geschieht, wo die Dicke der Luftschicht 4/4, 6/4 . . . Wellenlängen groß ist; daher verhalten sich die Dicken der Luftschichten an den dunkeln Stellen wie die geraden Zahlen, und die Durchmesser der dunkeln Ringe wie die Wurzeln aus den geraden Zahlen. — Da für violettes Licht wegen seiner kleineren Wellenlänge der Punkt f, wo die Dicke fh gleich ¼ Wellenlänge ist, näher an a liegt als für rothes Licht, und da dasselbe für i gilt, so müssen die Durchmesser der Ringe und daher auch die Breiten der Ringe für violettes Licht kleiner sein, als für rothes, und müssen für die übrigen Farben allmälig vom Roth nach dem Violett hin abnehmen. Nimmt man daher weißes Licht, so werden direct neben dem dunkeln Flecke die violetten und blauen Ringe sich zu einem bläulichen Weiß mischen, dann wird durch Zumischung von Gelb, Grün und Orange Gelb entstehen, welches wegen allmälig schwindendem Blau und dann auftauchendem Roth dieser Farbe weichen muß. — Im durchgelassenen Lichte erscheinen bei Anwendung homogenen Lichtes dunkle Ringe, wo

Fig. 203.

im reflectirten helle stehen und umgekehrt; bei Anwendung weißen Lichtes sind die Ringe im durchgelassenen Lichte complementär zu denen im reflectirten Lichte; doch sind die Erscheinungen viel matter als in reflectirtem Lichte. Die Umkehrung der Erscheinungen erklärt sich folgendermaßen: Geht ein Theil des Strahlenbündels l i bei m durch die untere Platte, so trifft es zusammen mit einem anderen Theile, der bei i und bei k reflectirt wurde, der also ebenfalls gegen den ersten Theil um $^4/_4$ Wellenlängen zurück ist; dieser zweite Theil ist aber außerdem zweimal von einem dichteren Medium reflectirt worden, hat also noch 2mal eine Verschiebung um $^1/_2$ Wellenlänge erfahren; folglich ist das durchgelassene Licht immer um $^1/_2$ Wellenlänge gegen das reflectirte verschieben; was bei dem letzteren ausgelöscht wird, wird bei ersterem verstärkt, und umgekehrt. — Hier bietet sich eine zweite Methode zur Bestimmung der Wellenlängen der verschiedenen Farben und der Schwingungszahlen dar. Man kann nämlich aus der bekannten Krümmung der Linse und aus den Radien af, ai .... der Ringe die Dicken hf, ki .... der Luftschichten berechnen. Diese Dicken sind aber $^1/_4$, $^3/_4$ .... der Wellenlängen des angewandten homogenen Lichtes, woraus diese Wellenlängen selbst leicht zu finden sind; so ergeben sich abermals die oft angeführten Schwingungszahlen und zwar in derselben Größe wie bei Fresnels Spiegelversuch. — Aus den Farben dünner Blättchen erklären sich die Farben der Fischschuppen, die Nobili'schen Farben auf Metallgefäßen und die anderen im Eingange dieses Capitels angeführten Farben. Fizeau benutzte (1866) die Lamellenfarben zum Studium der Ausdehnung der Krystalle durch die Wärme. Clausius erklärte (1849) das Himmelblau durch die dünnen Häutchen der in der Luft schwebenden Wasserbläschen, die im reflectirten Lichte bei größter Dünne das Blau erster Ordnung erzeugen, dem durchgelassenen Lichte aber das complementäre Orange überlassen und dadurch das Morgen- und Abendroth, sowie die rothe Färbung von Sonne und Mond am Horizont hervorbringen. Brücke zeigte (1852), daß alle trüben Medien durch Interferenz im reflectirten Lichte vor einem dunkeln Hintergrunde blau, vor einem hellen, also im durchgelassenen Lichte roth erscheinen. Ein trübes Medium ist nach Brücke ein durchsichtiger Körper, der Theilchen eines anderen Mediums enthält, in welchem sich das Licht schneller oder langsamer fortpflanzt; das in ein solches Theilchen eindringende Licht wird an der vorderen und hinteren Fläche reflectirt und durch diese Reflexion allein ausgelöscht; wären die Theilchen unendlich klein, so würde das trübe Medium dunkel erscheinen. Wenn sie aber an diese Kleinheit nur grenzen, so wird nicht alles Licht verlöscht, es bleibt im reflectirten Lichte Violett, Blau, Grün zurück, die sich zu Blau vereinigen, während dem durchgehenden Lichte das complementäre Orange bleibt (Göthes Urphänomen).

Auch dicke Platten können Interferenzstreifen bilden, wenn sie Lichtstrahlen so reflectiren, daß reflectirte Strahlen mit verschiedenen Phasendifferenzen an verschiedenen Stellen auf einander fallen. Wird eine genau parallel geschliffene Spiegelglasplatte in 2 Platten zerschnitten und werden dieselben unter sehr kleinem Winkel gegen einander geneigt aufgestellt (Fig. 204), so sieht man nach Brewster (1814) Interferenzstreifen, wenn

Fig. 204. Fig. 205.



man durch das Plattenpaar nach einer schmalen Lichtquelle sieht. Denn bei paralleler Entfernung S der Platten legen die Strahlen a und b zwischen den Außenflächen der Platten, wenn deren Dicke = s ist, die Wege 4s + 3S zurück, und die Strahlen c und d die

Wege 4s + S; sind die Platten jedoch wenig geneigt, so ist der Weg von a etwas verschieden von dem Wege von b, und ebenso haben c und d dann einen Phasenunterschied, der dem von a und b nicht ganz gleich ist; hierdurch sind die Bedingungen der Interferenz erfüllt. — Jamin (1858) erhielt starke Interferenzstreifen bei einer großen Entfernung der zwei gegen einander schwach geneigten Platten; die Erklärung derselben gibt ein Blick auf Fig. 205; bei paralleler Plattenstellung sind die Wege von a und b = 2s + S, bei etwas geneigter entsteht ein Phasenunterschied. Auf dieser Interferenz beruht Jamins Interferenzrefractor und Compensator, welche zur Bestimmung von Brechungsexponenten mit großer Genauigkeit z. B. von Gasen und anderen Studien Anwendung fanden (Kettler 1865).

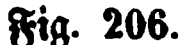
Die Beugung oder Diffraction des Lichtes (Grimaldi 1765, Fresnel 1826, Schwerd 1835). Unter Beugung versteht man die mit Interferenz verbundene Ablenkung des Lichtes hinter den Rand undurchsichtiger Körper, wo sich dann durch Interferenz dunkle und helle Streifen bilden. Grimaldi fand schon, daß das Sonnenbildchen in der optischen Kammer etwas größer ist, als es nach der geometrischen Construction sein sollte und daß dasselbe von schwachen farbigen Ringen umgeben ist. Newton ließ homogenes Licht durch einen schmalen Spalt eintreten und fand, daß zu beiden Seiten des Lichtstreifens dunkle und helle Streifen von gleicher Farbe auftreten, die sich nach beiden Seiten allmälig verlieren. Bei rothem Lichte sind wieder die Streifen am breitesten, beim violetten am schmälsten; auch erscheinen sie breiter, wenn der Spalt dünner wird. Im Sonnenlichte stehen zu beiden Seiten des Spaltes wieder farbige Streifen. Fresnel hat auf Grund der Wellentheorie eine mathematische Erklärung der Beugungserscheinungen gegeben; Fraunhofer und Schwerd haben dieselben auf einfache und zusammengesetzte Oeffnungen von den verschiedensten Formen ausgedehnt und die Art der Beugungserscheinungen oft eher durch Rechnung gefunden als durch den Versuch, der dann immer das Resultat der Rechnung bestätigte. 370

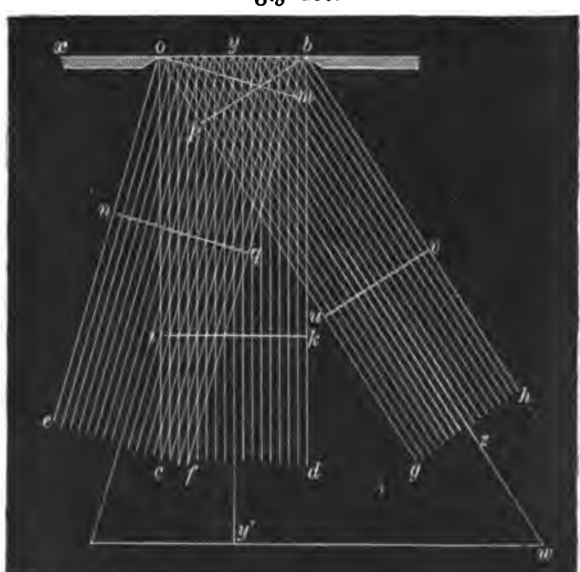
Die Anordnung der Versuche kann verschieden sein: Man läßt durch einen Spalt im Fensterladen Sonnenlicht oder durch einen Spalt in einer ein Lampenlicht umgebenden dunkeln Blechröhre dieses Licht in ein dunkles Zimmer treten, läßt dieses Bündel durch den parallelen Spalt eines Schirmes gehen und fängt nun das Bündel auf einem zweiten, weit entfernten Schirme auf; auf diesem erscheint dann das Bild des Spaltes und zu beiden Seiten helle und dunkele Streifen, wenn man das Licht durch Einschalten von Glastafeln oder Flüssigkeiten homogen gemacht hat; dagegen erscheinen verschiedenfarbige Streifen, wenn das Licht heterogen ist. Fraunhofer setzte den zweiten Spalt oder die beugende Oeffnung überhaupt vor das Objectiv eines Fernrohres und sah mit demselben nach dem ersten Spalte hin. Schwerd benutzte als Lichtquelle den hellen Punkt in einem geschwärzten Uhrglase oder einem Metallknopfe oder die Lichtlinie in einem inwendig geschwärzten Röhrchen und sah einfach mit der Beugungsöffnung gegen diese Lichtquellen hin; die Oeffnungen müssen aber dann sehr fein sein und können durch auf einander gelegte Stanniolblättchen, die feine Einschnitte tragen, vielerlei Formen erhalten. Ist die beugende Oeffnung ein Parallelogramm, so erscheint dieselbe von zahlreichen hellen Parallelogrammen nach allen Richtungen umlagert; durch eine dreieckige Oeffnung sieht man einen sechsstrahligen Stern. Durch zwei parallele Spalte erscheint ein Bild fast wie bei einem Spalt, nur ist es von zahlreichen dunkeln, dicken Linien nach der Breite durchzogen. Ebenso erscheint durch 2 kreisförmige Oeffnungen das Bild wie durch einen Kreis, nur ist es von dunkeln Strichen senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Oeffnungen durchzogen; durch 4 Oeffnungen erscheinen noch mehr dunkle Linien senkrecht zu den vorigen, so daß das ganze Bild wie von einem Quadrat-Gitter überlagert ist. Durch ein Stabgitter sieht man bei homogenem Lichte eine helle Mittellinie und mehrere seitliche gleiche Linien in verschiedenen Abständen; bei violettem liegen sie näher an der Mitte als bei rothem Lichte; bei Anwendung weißen Lichtes erscheinen zu beiden Seiten der Lichtlinie Spectra, regelmäßiger als die prismatischen, sogar die Fraunhofer'schen Linien zeigend. Zwei gekreuzte Gitter geben ein prächtiges Bild, in welchem ein heller Punkt nach allen Richtungen von Spectren umlagert ist.

Erklärung der Beugung. Um die Beugungserscheinungen wenigstens für den einfachsten Fall, für einen Spalt abzuleiten, müssen wir die Interferenz zweier Strahlen für den Fall prüfen, wo der Phasenunterschied nicht eine gerade oder ungerade Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, sondern weniger oder mehr. Dafür benutzen wir 226.; dort

fanden wir für die Schwingungsweite eines Atoms, das von 2 Wellen gleichzeitig erregt wird, die Formel $R = \sqrt{[r^2 + r_1^2 + 2rr_1 \cos 2\pi (a : l)]}$, worin r und r_1 die beiden Einzelamplituden, l die Wellenlänge und a der Abstand der beiden wellenerregenden Punkte in der Richtung des Strahles. Da nun in einem beleuchteten Spalte die verschiedenen Punkte gleiche Intensitäten und daher bei homogenem Lichte auch gleiche Amplituden haben, so ist $r_1 = r$ und daher $R = r \sqrt{[2 + 2 \cos 2\pi (a : l)]}$.

Erinnern wir uns nun an das Huyghens'sche Princip (230.), so folgt für die Beugung aus demselben, daß von jedem Lichtpunkte in einem Spalte Lichtwellen, also auch Strahlen nach allen Richtungen ausgehen; es wird daher jeder Punkt des Schirmes oder auch der Netzhaut von Strahlen aus allen Punkten des Spaltes getroffen, die man wegen der Größe der Entfernung des Spaltes im Verhältnisse zu seiner Kleinheit als parallel ansehen kann. Es stellen demnach Fig. 206 obdc, obhg, obfe Strahlenbündel für einzelne Punkte des Schirmes vor, deren Aetherschwingungen in ob, dem Querschnitte des Spaltes, sämmtlich von gleicher Phase sind. Innerhalb eines solchen Bündels können die Strahlen nur an den Stellen auf einander einwirken, die in einer Senkrechten zur Richtung des Strahles liegen, weil die Aetherschwingungen senkrecht auf dem Strahle stehen. (Umgekehrt folgt aus der Thatsache, daß solche Einwirkungen stattfinden, die senkrechte Richtung der Aetherschwingungen zum Strahle.) Solche wirksame Stellen sind z. B. in dem Bündel obdc die Punkte von ik, in dem Bündel obfe die Punkte von om und nq, in dem Bündel obhg die Punkte von bp und uv. In ik sind alle Strahlen in gleicher Phase, in om und on, sowie in bq und uv aber nicht. Der Phasenunterschied hängt von der Länge von bm und von


Fig. 206.



op ab, und diese Länge wird von der schiefen Richtung der Strahlen bedingt. Ist z. B. bm gleich ½ Wellenlänge, so haben je zwei neben einander liegende von den 16 Strahlenbündeln den Phasenunterschied $^1/_{32}\, l$. In unserer Formel für R bedeutet nun a (s. 266.) den Abstand der beiden wellenerregenden Punkte in der Richtung des Strahles; zwischen o und b ist der Abstand solcher zwei Punkte $^1/_{16}$ des Spaltes; der ganze Spalt auf den Strahl projicirt, in der Richtung des Strahles gemessen ist = bm = ½ Wellenlänge; demnach ist a für 2 neben einander liegende Strahlen = $^1/_{32}\, l$, überhaupt immer gleich dem Phasenunterschiede. Da in dem Bündel obcd der Phasenunterschied = o ist, so ist auch a = o; folglich ist R = 2r d. h. die Strahlen wirken nur verstärkend auf einander; die Punkte, die von dem senkrechten Bündel getroffen werden, haben die größte Lichtstärke. Wo aber die Strahlen so schief auffallen, daß der Phasenunterschied der Randstrahlen wie in obfe eine halbe Wellenlänge beträgt, da ist $a = {}^1/_{32}\, l$, daher $R = r \sqrt{[2 + 2 \cos (360 : 32)]} = r \sqrt{3{,}962} = 1{,}97\, r$. In diesem Bündel, dessen Strahlen auf einander einwirken, weil sie sich in einem Punkte vereinigen, heben sich zwar die Randstrahlen einander auf, weil ihr Phasenunterschied $^1/_2\, l$ ist, aber die zwei mittleren, für welche der Phasenunterschied nur $^1/_{32}\, l$ ist, bringen zusammen nahezu die doppelte Wirkung eines einzigen hervor. Fassen wir die zwei zu beiden Seiten der zwei mittleren ins Auge, deren $a = {}^3/_{32}\, l$, so ergibt sich $R = r \sqrt{3{,}663} = 1{,}91\, r$; und so ergibt sich die Wirkung zweier immer mehr nach dem Rande zu gelegenen Strahlen immer kleiner, bis sie für die 2 Randstrahlen endlich = Null ist. Wenn nun auch die Wirkung des Bündels obfe nicht derjenigen von obdc gleich ist, so ist doch immer noch eine sich hinter den Rand xo fort-

pflanzende Lichtwirkung vorhanden; das Bild des Spaltes breitet sich weiter aus, als es dem Mittelbündel, der geometrischen Construction entspricht; diese Ausbreitung nimmt aber an Lichtstärke allmälig ab. Wie weit sie geht, wird sich sogleich, bei der Betrachtung des Bündels obhg zeigen, dessen Richtung so schief ist, daß der Gangunterschied op der Randstrahlen eine ganze Wellenlänge beträgt.*) Hieraus folgt sogleich, daß der Gangunterschied des Mittelstrahles yz und des Randstrahles bh 1/2 Wellenlänge ausmacht, daß sich also diese beiden aufheben; dasselbe geschieht aber auch mit dem ersten Strahle links von yz und links von bh, weil ihr Gangunterschied ebenfalls $1/2\,l$ ist, und ebenso mit dem zweiten Strahle links von yz und von bh; kurz zu jedem Strahle ist ein anderer vorhanden, der ihn auslöscht, weil ihr Phasenunterschied 1/2 Wellenlänge ist. Der Punkt seitlich von dem Bilde des Spaltes, auf den das Bündel obhg fällt, ist also dunkel; zu beiden Seiten des verbreiterten Spaltbildes entstehen dunkle Streifen, in die sich das Bild allmälig verläuft. — Gehen wir nun zu dem (in der Figur nicht mehr gezeichneten) Bündel über, dessen Randstrahlen 3/2 Wellenlängen Phasenunterschied haben, so läßt sich dasselbe leicht in 3 Bündel zerlegen; der erste Strahl des ersten Theilbündels und der erste des zweiten sind um $1/2\,l$ verschieden, heben sich daher auf, ebenso die zwei zweiten Strahlen, die zwei dritten u. s. w.; kurz zwei dieser Theilbündel heben sich auf, und es bleibt noch das dritte übrig, dessen Randstrahlen um $1/2\,l$ verschieden sind, und das deßhalb den dritten Theil der Wirkung von obfe ausübt. Folglich stehen zu beiden Seiten der dunkeln Streifen zwei helle Streifen, die allmälig in die dunkeln übergehen. Weitere Betrachtung ergibt, daß in ähnlicher Weise dunkle und helle, aber immer schwächer werdende Streifen mit einander abwechseln. — Je feiner der Spalt ist, desto schiefer muß die Richtung eines Bündels werden, damit der Phasenunterschied seiner Randstrahlen um 1/2 Wellenlänge wachse; die Streifen werden demnach um so breiter, je dünner der Spalt ist. Ebenso muß die Richtungsänderung des Bündels um so größer für die Erzielung dieses Phasenunterschiedes sein, je größer die Wellenlänge des Lichtes ist; folglich hat das rothe Licht die breitesten Streifen. — Bei der Anwendung weißen Lichtes muß an der Stelle, wo für Roth der erste dunkle Streifen steht, für Violett und Blau schon ein heller vorhanden sein, weil für diese der Phasenunterschied von 3/2 Wellenlänge durch dieselbe Schiefe des Bündels schon erreicht ist, die bei dem rothen Lichte kaum einen Unterschied von 1 Wellenlänge erzeugt; wo also Blau und Violett verlöscht sind, müssen Grün und Roth vorhanden sein. Bei Anwendung von weißem Lichte entstehen also farbige Streifen zu beiden Seiten des weißen Bildes. Violett grenzt übrigens nicht direct an das weiße Spaltbild; denn auch in diesem ist der rothe und gelbe Bestandtheil breiter als die übrigen; Violett und Blau sind schon an Stellen verlöscht, wo Roth, Gelb und Grün noch vorhanden sind; das weiße Bild geht also durch Gelb und Roth in Blau über, auf welches dann die Farben der Newton'schen Ringe folgen. — Hier begegnet uns ein drittes Mittel, die Schwingungszahlen zu bestimmen; es findet nämlich in Fig. 206 wegen der Aehnlichkeit der Dreiecke obq und ywy' folgendes Verhältniß statt: $yy' : y'w = bp : op$. Hierin ist bekannt yy', der Abstand des Schirmes vom Spalte, y'w das halbe Mittelbild bis zur Mitte des ersten dunkeln Streifens, bp ohne merklichen Fehler gleich der Breite des Spaltes; hieraus läßt sich die Unbekannte op, die Wellenlänge, und aus dieser die Schwingungszahl finden.

Ein besonderes Interesse bietet noch die Beugung durch ein Stabgitter, das aus vielen parallelen Spalten zusammengesetzt ist. Schon durch zwei Spalte entstehen starke dunkle Striche, selbst in dem Hauptbilde des Spaltes, weil in dasselbe die Strahlen aus beiden Spalten eindringen, die an einzelnen Stellen um 1/2 Wellenlänge verschieden sind und sich so einander aufheben. Diese schwarzen Linien vermehren sich mit der Zahl der Spalte und fließen endlich bei einem Gitter zu breiten, dunkeln Feldern zusammen, zwischen denen bei homogenem Lichte nur einzelne helle Linien stehen bleiben, von welchen die Mittellinie die hellste ist. Wie nun in dem Beugungsbilde eines Spaltes zunächst an dem Hauptbilde das Violett an Stellen wieder auftaucht, an denen das Roth noch verlöscht ist, so stehen auch in dem Beugungsbilde mehrerer Spalte oder eines Gitters bei blauem Lichte die hellen Seitenlinien der Mittellinie näher als bei dem rothen Lichte. Wird daher weißes Licht benutzt, so müssen dem Mittelbilde zunächst die violetten Theile stehen, denen die übrigen sich gleichmäßig anschließen. Es entstehen daher beiderseits Spectra von homogenen Farben, die sich öfter wiederholen, anfänglich durch dunkle Felder getrennt sind, aber später sich theilweise decken. Diese Spectra werden um so reiner und deutlicher, je größer die Zahl der Spalte wird und je feiner dieselben sind; bei hinlänglicher Feinheit lassen sich sogar die Fraunhofer'schen Linien erkennen. Diese Beugungsspectra sind dadurch

*) In der Figur ist der Deutlichkeit wegen die Schiefe der zwei in Betracht gezogenen Strahlenbündel bedeutend übertrieben.

von den prismatischen verschieden, das bei ihnen Grün in der Mitte liegt und die Ausdehnung der 7 Farben ziemlich gleich ist, während bei der Brechung die rothen Strahlen zusammengedrängt und die violetten aus einander gedehnt werden. — Aus der Entfernung der hier auftretenden Fraunhofer'schen Linien von dem Mittelbilde, dem Abstande des Schirmes vom Gitter und dem Abstande zweier Spalte ergibt sich eine vierte Methode, die Schwingungszahlen zu berechnen (Eisenlohrs Methode 1856; derselbe fand nach dieser sogar die Wellenlänge des äußersten Ultraviolett = 0,000 355mm).

Aus der Beugung erklären sich die Farben, die man beim Augenzwinkern gegen Lichtpunkte sieht, die Farben, die durch Musselin, Flor und andere Zeuge, sowie durch die Flügel- und Schwanzfedern kleiner Vögel gesehen werden können, wenn man durch diese Gegenstände nach hellem Lichte blickt. Prächtige Erscheinungen geben die Robert'schen Glasgitter, besonders die Kreuzgitter. Auch die Spinnweben, die feinen Haare der Wolle, der Seide u. s. w. zeigen im Sonnenscheine Beugungsfarben. Bestreut man eine Glastafel mit Hexenmehl, so erscheint ein durch dieselbe betrachtetes Licht mit einem Kreise von Beugungsfarben umgeben; ebenso das Spiegelbild eines Lichtes in einem dunstbehauchten Fenster. Man erklärt auch die kleinen Höfe um Sonne und Mond durch Beugung der Lichtstrahlen an den Rändern der Nebelbläschen.

372 **Die doppelte Brechung des Lichtes** (Bartholin 1669, Huyghens 1691). Unter der doppelten Brechung versteht man die Eigenschaft vieler durchsichtigen Körper, einen eindringenden Lichtstrahl in zwei Strahlen zu zerlegen und beide Bestandtheile von der ursprünglichen Richtung abzulenken. Diese Eigenschaft zeigen die Krystalle aller Systeme mit Ausnahme der des regulären, sowie gepreßte und ungleichmäßig erwärmte und abgekühlte Gläser. Bei den Krystallen des quadratischen und des hexagonalen Systems befolgt der eine der beiden gebrochenen Strahlen die Gesetze der einfachen Brechung und heißt deßhalb der gewöhnliche Strahl; der andere befolgt diese Gesetze nicht, geht aus der Einfallsebene, hat in verschiedenen Richtungen einen verschiedenen Brechungsexponent und weicht daher bald mehr, bald weniger von dem gewöhnlichen Strahle ab; er heißt deßhalb der ungewöhnliche Strahl. In vielen dieser Krystalle wird der ungewöhnliche Strahl weniger gebrochen als der gewöhnliche; sie werden negative Krystalle genannt; zu ihnen gehören Kalkspath, Turmalin, Beryll, Saphir, Rubin, Blutlaugensalz. In anderen Krystallen, positive genannt, wird der ungewöhnliche stärker als der gewöhnliche gebrochen; solche sind Bergkrystall, Zirkon, Eis, Zinnstein. Sämmtliche doppelt brechende Krystalle haben indeß auch Richtungen, in denen nur einfache Brechung stattfindet; man nennt diese Richtungen optische Achsen. Die Krystalle des quadratischen und des hexagonalen Systems sind optisch einachsig, haben nur eine optische Achse, welche mit der krystallographischen Hauptachse zusammenfällt. Die Krystalle des rhombischen, des klinorhombischen und des klinorhomboidischen Systems dagegen sind optisch zweiachsig, sie haben zwei Richtungen, in denen einfache statt doppelter Brechung stattfindet. Diese zwei Achsen haben die verschiedenste Neigung gegen einander, z. B. beim Salpeter 5°, beim Gyps 57°, beim Feldspath 64°, beim Eisenvitriol 90°, und stehen nicht in einfacher Beziehung zu den krystallographischen Achsen.

Die einfachste Erscheinung der doppelten Brechung zeigt besonders deutlich der isländische Doppelspath; legt man ein solches durchsichtiges Rhomboeder auf ein weißes Blatt mit einem schwarzen Punkte, so sieht man diesen doppelt; Gegenstände durch denselben gesehen erscheinen zweimal; bringt ein Lichtbündel durch eine Oeffnung eines auf demselben liegenden Kartenblattes, so sieht man dasselbe sich spalten. Werden die zwei stumpfen Ecken eines solchen Rhomboeders senkrecht zu ihrer Verbindungslinie weggeschliffen und wird der Krystall mit einem dieser Schnitte auf einen Punkt gelegt, so erscheint er nur einfach; der Strahl hat jetzt die Richtung der optischen Achse. Betrachtet man dagegen durch diese zwei Schnitte einen seitlich stehenden Gegenstand, so erscheint er wieder doppelt, doch liegen beide Bilder nach der Richtung des Gegenstandes; dasselbe ist auch der Fall, wenn der Krystall so geschliffen ist, daß seine Oberfläche der optischen Achse parallel ist; in allen anderen Fällen erscheint das eine Bild außerhalb der Verbindungslinie des anderen mit dem Gegenstande, woraus zu ersehen ist, daß in den meisten Fällen der eine gebrochene Strahl aus der Einfallsebene tritt. Schleift man ein Kalkspathprisma so zurecht, daß die brechende Kante der optischen Achse parallel ist, so findet man die B.-E. der beiden Strahlen = 1,654

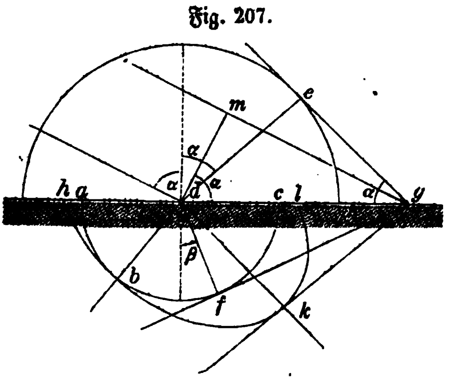
und 1,483; für Prismen, die eine andere Richtung der brechenden Kante zur optischen Achse haben, findet man den B.-E. des am meisten abgelenkten Strahles immer = 1,654 und den des anderen Strahles größer als 1,483. Ein Prisma, dessen brechende Kante auf der optischen Achse senkrecht steht, ergibt beim symmetrischen Durchgange nur einen gebrochenen Strahl vom B.-E. 1,654; durch ein solches Prisma sieht man bald ein, bald zwei Bilder, je nachdem man die Strahlen senkrecht oder schief gegen die Achse auftreffen läßt. Ein Quarzprisma ergibt für den am wenigsten abgelenkten Strahl immer den B.-E. 1,584, während der des mehr abgelenkten zwischen 1,548 und 1,558 liegt; den letzten findet man, wenn man den Strahl senkrecht zur Achse durch zwei Flächen eines Bergkrystalls gehen läßt.

373 Zur Erklärung der doppelten Brechung muß auf die Entstehung der Krystalle zurückgegangen werden. Bei den Krystallen des regulären Systems sind die Hauptdimensionen einander gleich; es mußte folglich bei der Entstehung in allen Richtungen eine gleich starke Anlagerung stattgefunden haben, es mußte die Anziehung des ersten Krystallkeimes und des wachsenden Krystalls nach allen Richtungen gleich groß sein; folglich mußten sich die Moleküle nach allen Richtungen in gleicher Dichte anlagern, wodurch auch der Aether nach allen Richtungen dieselbe Dichte erhielt. Bei den Krystallen des quadratischen und des hexagonalen Systems mußte in der Richtung der Hauptachse ein stärkeres oder schwächeres Anwachsen stattfinden als in den dazu senkrechten Richtungen, in welchen wegen der Gleichheit der Dimensionen ein gleiches Anwachsen vorausgesetzt werden muß; folglich muß die Dichte des Aethers in der Richtung der Hauptachse größer oder kleiner sein als in den dazu senkrechten Richtungen, in welchen eine gleiche Aetherdichte stattfinden muß. Endlich ergibt sich auf ähnliche Weise, daß für die übrigen Krystallsysteme der Aether nach allen drei Dimensionen eine verschiedene Dichte besitzt. Setzen wir nun voraus, daß die Elasticität des Aethers überall dieselbe ist, so folgt zunächst, daß in dem regulären System das Licht sich nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzt, bei den zwei folgenden Systemen nach der Hauptachsenrichtung mit größerer oder kleinerer Geschwindigkeit als in den dazu senkrechten Richtungen, und bei den drei letzten Systemen in allen drei Richtungen mit verschiedener Geschwindigkeit: das Lichtmedium ist nur im regulären System isotrop, in allen anderen Systemen anisotrop. Im Kalkspath z. B. ist die Aetherdichte in der Richtung der Hauptachse größer als in den dazu senkrechten Richtungen, das Licht pflanzt sich daher in der ersten Richtung nach der Fl. $c = \sqrt{(e:d)}$ langsamer fort als in den letzteren, in welchen übrigens hier die Geschwindigkeiten gleich groß sind. Langt daher ein Lichtstrahl in der Richtung der Hauptachse an, so können sich seine Schwingungen, da sie in der Richtung der Hauptachse fortschreitend immer auf Aether von derselben Dichte treffen, mit unveränderter Geschwindigkeit fortpflanzen wie in einem isotropen Medium: es findet einfache gewöhnliche Brechung statt. Hat jedoch der Strahl eine andere Richtung, so findet das Fortschreiten jeder Schwingung nicht nur in der Richtung der Hauptachse, sondern auch in anderen Richtungen statt; selbst wenn der Strahl senkrecht zur Hauptachse steht, gibt es in ihm Schwingungen, die schief gegen dieselbe gerichtet sind, da die Schwingungen nach allen zum Strahle senkrechten Richtungen vor sich gehen. Da nun das Fortschreiten der Schwingungen in der Richtung der Hauptachse mit geringerer Geschwindigkeit stattfindet als in allen anderen Richtungen, so muß jede Schwingung in zwei Componenten zerlegt werden, von denen die eine in der Richtung der Hauptachse fortschreitet, also auf der Hauptachse senkrecht steht, während die andere auf der ersten senkrecht steht. In allen Fällen also, wo der Strahl nicht die Richtung der Hauptachse hat, muß jede Schwingung in zwei Schwingungen zerlegt werden, von denen eine auf der Hauptachse senkrecht steht. Diese Schwingung steht nicht blos senkrecht auf der Hauptachse, sondern auch auf der Richtung ihres Strahles: folglich steht sie auf der durch beide Linien bestimmten Ebene, dem Hauptschnitte, senkrecht; dies gilt natürlich von jeder Schwingung; demnach sind alle Schwingungen des Strahles einander parallel, der Strahl ist polarisirt und zwar stehen seine Schwingungen auf dem Hauptschnitte senkrecht. Die zweite Componente einer jeden ursprünglichen Schwingung muß zur ersten senkrecht sein, weil sie sonst noch eine zur ersten parallele Componente enthielte; folglich muß jede zweite Componente zum Hauptschnitte parallel sein, und, da sie ebenfalls auf ihrem Strahle senkrecht steht, so müssen alle diese Componenten einander parallel sein; es ist daher der zweite Strahl ebenfalls polarisirt und zwar senkrecht zu dem ersten.

Die aus den ersten Schwingungscomponenten gebildeten Strahlen pflanzen sich in der Achsenrichtung, also immer nach Richtungen gleicher Aetherdichte fort; ihre Elementarwelle ist daher wie bei der gewöhnlichen Brechung eine Kugel abc (Fig. 207), deren Radius db gleich der kleineren Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in der Achsenrichtung ist. Der Strahl ist gewöhnlich gebrochen; denn der Brechungsexponent ist immer gleich dem Radius de der Kugelwelle des alten Mediums dividirt durch den Radius df der Kugel-

welle des neuen Mediums und daher constant, und die Brechungsebene fällt mit der Einfallsebene zusammen, weil die von einem Punkte g an beide Kugelwellen gezogenen Tangentialebenen gf und ge die beiden Kugeln in einer mit der Einfallsebene zusammenfallenden Ebene gef berühren. Die zweite Componente jeder Schwingung muß zwar auf der ersten senkrecht stehen und dem Hauptschnitte parallel sein, kann aber sehr verschiedene Richtungen haben, da die Schwingungen des ursprünglichen Strahles nach allen nur denkbaren Richtungen auf demselben senkrecht stehen. Nun pflanzt sich aber jede Schwingung in der zu ihr senkrechten Richtung fort; folglich sind die Fortpflanzungsrichtungen der Schwingungen auch unendlich zahlreich. Eine von diesen Richtungen fällt wieder in die optische Achse, weil unter allen Richtungen, die auf einer zu einer Geraden Senkrechten senkrecht stehen, noch eine vorhanden ist, die auf der Geraden senkrecht steht. In dieser Richtung ist die Geschwindigkeit der Fortpflanzung wieder gleich der kleinsten in der optischen Achse. In den nur wenig abweichenden Richtungen ist die Geschwindigkeit nur wenig größer; sie nimmt aber zu mit der Abweichung von der optischen Achse, und ist in der hierzu senkrechten Richtung am größten. Wenn wir daher die Punkte, in welchen die von einem Punkte ausgehende Schwingungsbewegung nach gleicher Zeit anlangt, verbinden, so entsteht keine Kugelwelle, sondern eine Sphäroidfläche hbkl (Fig. 207), welche die Kugelwelle in der Richtung der optischen Achse von außen berührt und einschließt, weil in dieser Richtung die betreffende Geschwindigkeit beiden gemein ist, in jeder anderen aber die zur Sphäroidfläche gehörige größer als die zur Kugelwelle gehörige ist. Stellt demnach db die optische Achse vor, so berührt die Sphäroidwelle hbkl die Kugelwelle abcf in b, und nach der bekannten Construction (S. 236) ist df der gewöhnliche oder ordentliche und dk der außerordentliche Strahl. Leicht ist schon aus der Figur zu ersehen, daß und warum der außerordentliche Strahl weniger gebrochen ist als der ordentliche; es ergibt sich indeß auch aus der Betrachtung des Brechungsexponenten. Derselbe ist für den außerordentlichen Strahl gleich dem Radius de der alten Elementarwelle dividirt durch den Abstand dk; da dieser immer größer als db ist, so ist der Brechungsexponent des außerordentlichen Strahles immer kleiner als der des ordentlichen, der außerordentliche Strahl wird weniger gebrochen als der ordentliche, wodurch sich der Name negative Krystalle erklärt; da derselbe von der optischen Achse mehr abweicht als der ordentliche, so ist auch der frühere Name repulsive Krystalle erklärlich. Weiter wird jetzt klar, warum der Brechungsexponent des außerordentlichen Strahles veränderlich ist; je nach der Richtung des einfallenden Strahles ändert sich die Lage der Tangentialebene gk und dadurch der Nenner dk des Bruches, der den Werth des Brechungsexponenten angibt; der außerordentliche Strahl ändert also seine Lage gegen den ordentlichen mit dem Einfallswinkel. Der Brechungsexponent ist am größten (für Kalkspath = 1,654), wenn dk auf db fällt, wenn also der außerordentliche mit dem ordentlichen zusammen in die optische Achse fällt, und am kleinsten (für Kalkspath = 1,483), wenn dk seinen größten Werth hat, d. h. wenn der außerordentliche Strahl auf der optischen Achse senkrecht steht; in allen anderen Fällen liegt beim Kalkspath der Brechungsexponent zwischen 1,654 und 1,483, weil dk dann größer als db und kleiner als die zu db senkrechte Sphäroidachse ist. Im letzteren der angeführten Fälle liegt der außerordentliche Strahl auch in der Einfallsebene, sowie überhaupt in den Fällen, die in der Figur möglich sind, d. h. wenn die optische Achse in die Einfallsebene fällt, oder wenn die brechende Krystallfläche auf der optischen Achse senkrecht steht. In allen anderen Fällen berührt die Tangentialebene gk das Sphäroid außerhalb der Ebene der Figur, außerhalb der Einfallsebene, also tritt der außerordentliche Strahl aus der Einfallsebene hinaus. So erklären sich die Erscheinungen der doppelten Brechung für alle negativen Krystalle. Bei Bergkrystall und anderen positiven Krystallen ist die Lichtgeschwindigkeit in der Achsenrichtung die größte; die Kugelwelle schließt dann die Welle der zweiten Componente ein, welche in diesem Falle ein Umdrehungsellipsoid ist, d. i. eine solche Fläche, die durch Rotation einer Ellipse um ihre große Achse entsteht; hieraus ist leicht ersichtlich, daß der B.-E. des außerordentlichen Strahles größer ist als der des ordentlichen.

Fig. 207.



Die Ebene des Hauptschnittes, auf welcher die Schwingungen des ordentlichen Strahles

senkrecht stehen, ist nach verschiedenen Beziehungen characteristisch für diesen Strahl; geht derselbe durch einen zweiten Krystall, dessen Hauptschnitt dem des ersten parallel ist, so geht derselbe als ordentlicher Strahl weiter; bildet der zweite Hauptschnitt mit dem ersten einen immer größer werdenden Winkel, so geht der Strahl immer weniger als ordentlicher durch den zweiten Krystall, und am wenigsten, wenn dieser Winkel ein Rechter ist; ebenso ist bei gleichem Winkel die Intensität des aus dem zweiten Krystall tretenden ordentlichen Strahles immer dieselbe. Wegen dieses characteristischen Zusammenhanges des ordentlichen polarisirten Strahles mit dem ersten Hauptschnitte, auf welchem seine Schwingungen senkrecht stehen, nennt man dessen Ebene die Polarisationsebene des polarisirten Strahles; ebenso nennen wir überhaupt die Ebene, auf welcher die Schwingungen eines polarisirten Strahles senkrecht stehen, die Polarisationsebene desselben. Es ist übrigens noch ein Problem, ob die Schwingungen auf der Polarisationsebene senkrecht stehen oder derselben parallel sind. Manche Forscher, welche der letzteren Meinung zugethan sind, nennen demgemäß die Ebene, in welcher die Schwingungen des polarisirten Lichtes erfolgen, die Polarisationsebene, während nach unserer Ableitung diese Ebene, die Schwingungsebene, auf der Polarisationsebene senkrecht steht.

Die Erscheinungen der doppelten Brechung in optisch zweiachsigen Krystallen sind sehr verwickelt und nur der höheren Rechnung zugänglich. Sie wurden von Fresnel 1827 auf mathematischem Wege aus der Undulationstheorie abgeleitet und dann durch Versuche bestätigt, was diese Theorie zu kaum bestrittener Geltung brachte. Wie zur Construction der Strahlen bei den einachsigen Krystallen eine Verbindung einer Kugelfläche mit einer ellipsoidischen nöthig ist, so bedarf es hier noch mehr verwickelter Verbindungen von Ellipsoiden, um die Wellenoberfläche für Strahlen nach jeder Richtung aufzustellen. Schnitte dieser Wellenfläche durch Ebenen bilden meist zwei Curven, manchmal eine Ellipse und einen Kreis. So ist der Schnitt durch die Richtung der größten und der kleinsten Geschwindigkeit eine Ellipse und ein Kreis, die sich einander in vier Punkten schneiden. Nach diesen Punkten gehen die optischen Achsen; da aber an diesen Schnittpunkten eine trichterförmige Vertiefung stattfindet, so trifft auf die gemeinsame tangirende Wellenfläche ein ganzer Strahlenkegel, der beim Austritte als eine Welle fortschreitet. Diese von Hamilton 1829 theoretisch gefundene Erscheinung der sogenannten inneren conischen Refraction wurde von Lloyd beim Arragonit bestätigt gefunden. An die inneren Punkte des Trichters gibt es umgekehrt viele Tangentialebenen, die sich sämmtlich dem Schnittpunkte zuneigen; folglich muß ein auf den Punkt von innen nach außen fortschreitendes Strahlenbündel sich beim Austritte in einen Kegel ausbreiten; diese äußere conische Refraction wurde ebenfalls von Hamilton theoretisch geschlossen und durch Lloyds Versuche bestätigt.

Die Polarisation des Lichtes (Malus 1808). Polarisirtes Licht ist solches Licht, dessen Schwingungen einander parallel auf dem Strahle senkrecht stehen. Je nachdem die Schwingungen geradlinig, kreisförmig oder elliptisch sind, nennt man das Licht geradlinig, circular oder elliptisch polarisirtes Licht. Wir betrachten zunächst das geradlinig polarisirte Licht. Das polarisirte Licht unterscheidet sich von dem gewöhnlichen in der Reflexion, der Brechung, der Absorption, der doppelten Brechung und der Interferenz. Hieraus ergeben sich Mittel, das polarisirte Licht zu erkennen; die hierzu nöthigen Apparate nennt man Zerleger oder Analyseure. **375**

Von einem hinten geschwärzten Spiegel oder einer größeren Anzahl von Glasplatten wird polarisirtes Licht nur dann vollständig reflectirt, wenn dieser Analyseur eine solche Lage hat, daß die Schwingungen parallel zur spiegelnden Fläche sind, wenn also die Polarisationsebene und die Reflexionsebene zusammen fallen, weil diese Schwingungen dann nicht zwischen die Moleküle des Spiegels eindringen können; in diesem Falle erscheint also das Gesichtsfeld hell. Dreht man nun den Analyseur allmälig, dann sind die Schwingungen der Fläche nicht mehr parallel, enthalten aber noch eine parallele Componente, welche immer noch reflectirt wird. Da aber diese parallele Componente bei weiterer Drehung immer mehr abnimmt, so muß auch die Intensität des reflectirten Lichtes abnehmen, bis sie endlich bei einer Drehung um 90° am kleinsten, das Gesichtsfeld im reflectirten Lichte am dunkelsten ist. Während dieser Drehung wuchs dagegen die senkrechte Componente der Schwingungen immer mehr, welche leicht auf die Aetheratome zwischen den Molekülen stoßend einwirken und sich daher durch den Spiegel fortpflanzen konnte; in einem geschwärzten Spiegel wird diese Componente absorbirt, durch einen Glasstoß aber pflanzt sie sich fort. Folglich mußte hinter dem Glasstoße bei der Drehung allmälig das Licht sichtbar werden, an Intensität immer mehr zunehmen und endlich bei der Drehung von 90° am stärksten werden. Wird nun der Analyseur noch weiter gedreht, so nimmt die Intensität des reflectirten Gesichtsfeldes wieder zu und die des gebrochenen ab, bis bei 180° die erstere wieder

ein Maximum, die letztere ein Minimum erreicht hat; bei 270° ist dagegen das reflectirte Licht am schwächsten, das durchgelassene am stärksten u. s. w. — Ein anderer Analyseur ist eine dünne Turmalinplatte; der Turmalin hat die merkwürdige Eigenschaft, nur Schwingungen durchzulassen, die seiner Hauptachse parallel sind, und die zu derselben senkrechten Schwingungen zu absorbiren. Fallen daher zur Hauptachse parallele Schwingungen auf eine Turmalinplatte, durch welche man sieht, so erscheint das Gesichtsfeld hell; es bleibt auch hell, wenn man die Platte so dreht, daß die Achse immer den Schwingungen parallel ist; es nimmt aber an Helligkeit ab, wenn man die Achse zu einer wachsenden Neigung gegen die Schwingungen dreht, und erreicht bei 90° Drehung ein Minimum, wird dunkel. — Ein weiterer Analyseur ist der Doppelspath, der bekanntlich jeden Strahl in zwei Strahlen zerlegt, von welchen die Schwingungen des einen auf dem Hauptschnitte senkrecht stehen und die des anderen in demselben liegen. Läßt man demnach polarisirtes Licht so auf einen Doppelspath fallen, daß die Polarisationsebene in den Hauptschnitt fällt, daß also die Schwingungen auf dem Hauptschnitte senkrecht stehen, so können diese Schwingungen unzerlegt durch den Krystall gehen, es entsteht nur ein Bild; ebenso entsteht nur ein Bild, wenn die Schwingungen des polarisirten Lichtes in den Hauptschnitt fallen; in allen anderen Fällen entstehen zwei Bilder, welche an Stärke ab- und zunehmen, wenn man den Krystall aus der einen Lage in die andere dreht. Der beste Analyseur ist Nicols Prisma (1828). An einem Doppelspathrhomboeder werden die zwei parallelen Endflächen, die gegen die stumpfen Kanten unter 71° geneigt sind, so abgeschliffen, daß die Neigung noch 68° beträgt; dann wird der Krystall so durchschnitten, daß die Schnittfläche auf den zwei neuen Flächen und auf dem Hauptschnitte senkrecht steht. Die beiden Schnittflächen werden gut polirt, dann mit Canadabalsam zusammengekittet und der gekittete Krystall in eine geschwärzte Messinghülse gefaßt. Bei dem Eintritte in diesen Krystall wird ein gewöhnlicher Strahl in die bekannten zwei polarisirten Strahlen zerlegt; der ordentliche wird stärker gebrochen, fällt daher sehr schief auf die schwächer brechende Balsamschicht und wird deßhalb von derselben total reflectirt, auf die geschwärzte Hülse geworfen und dort absorbirt. Der außerordentliche Strahl aber, d. i. der Strahl, dessen Schwingungen im Hauptschnitte liegen, geht wegen schwächerer Brechung durch. Sieht man daher durch einen Nicol auf polarisirtes Licht, so geht dieses nur ungeschwächt durch, wenn seine Polarisationsebene auf dem Hauptschnitte senkrecht steht; in jedem anderen Falle wird es geschwächt und beim Zusammenfallen der beiden Ebenen ganz aufgehoben. Im durchgelassenen polarisirten Lichte erscheint daher das Gesichtsfeld eines Nicol bei der Drehung bald hell, bald dunkel, während es im gewöhnlichen Lichte immer hell ist. Die Interferenz des polarisirten Lichtes wird später betrachtet.

376 **Die Polarisationsapparate** oder Einrichtungen, mittels deren man polarisirtes Licht aus dem gewöhnlichen Lichte erzeugen kann, sind mancherlei Art. Es kommt nämlich zwar in der Natur polarisirtes Licht vor; doch ist dasselbe immer mit gewöhnlichem Lichte gemischt; reines oder wenigstens vorherrschend polarisirtes Licht muß man daher künstlich darstellen. Dies kann geschehen 1. durch Reflexion, 2. durch einfache Brechung, 3. durch Absorption, 4. durch doppelte Brechung.

1. Polarisation durch Reflexion. Alles von spiegelnden Flächen, mit Ausnahme von Metallflächen, reflectirte Licht ist theilweise polarisirt. Wenn nämlich eine Schwingung schief gegen eine spiegelnde Fläche trifft, so wird die zu dieser Fläche parallele Componente nicht in die Fläche einzudringen vermögen, sondern zurückgeworfen werden; der zurückgeworfene, aus diesen Schwingungen bestehende Strahl wäre vollständig polarisirt, wenn nicht die andere Componente auch noch theilweise zurückgeworfen würde. Die Schwingungen der ersten Componente stehen auf der Einfallsebene senkrecht, die der zweiten müssen in diese Ebene fallen, weil sie sowohl auf dem Strahle wie auf der ersten senkrecht stehen. Wird von dieser anderen Componente nichts zurückgeworfen, sondern dringt dieselbe vollständig in den reflectirenden Körper ein, so ist der reflectirte Strahl vollständig polarisirt. Wann dieser Fall eintritt, das hängt von der Größe des Einfallswinkels ab; derjenige Einfallswinkel, den der vollständig polarisirte reflectirte Strahl, also auch dessen einfallender Strahl mit dem Einfallslothe macht, wird Polarisationswinkel genannt. Für denselben besteht folgendes Gesetz: **Die Tangente des Polarisationswinkels ist gleich dem Brechungsexponenten des spiegelnden Körpers** (Brewster 1815).

Beweis (Fresnel 1831). Der Beweis ruht auf dem Princip von der Erhaltung der Kraft; die lebendige Kraft der Wellenbewegung des einfallenden Lichtes muß nach diesem Princip gleich sein der Summe der lebendigen Kräfte der Wellenbewegungen des reflectirten Lichtes und der eindringenden gebrochenen Strahlen. In Fig. 207, wo dm die einfallende Welle, ge die reflectirte und gf die gebrochene darstellt, vertheilt sich die Wellenbewegung im Dreieck dmg auf das gleiche Dreieck deg, das die reflectirte Wellenbewegung enthält, und auf das Dreieck dfg, das die gebrochene Wellenbewegung enthält; die 2 Inhalte dieser 3 Dreiecke verhalten sich wie dm . gm zu df . gf oder wie $\sin\alpha\cos\alpha : \sin\beta\cos\beta$. Bezeichnen wir nun die Dichte des Aethers im alten Medium mit δ, in dem neuen mit δ', so verhalten sich die wellenbewegten Aethermassen in den 2 ersten Dreiecken zu der Aethermasse des dritten Dreiecks wie $\delta\sin\alpha\cos\alpha : \delta'\sin\beta\cos\beta$. Wenn ferner die Geschwindigkeit der Wellenbewegung oder des Lichtes in der einfallenden Welle mit c, in der reflectirten mit x und in der gebrochenen mit y bezeichnet wird, so sind die lebendigen Kräfte der drei Wellenbewegungen $c^2\delta\sin\alpha\cos\alpha$, $x^2\delta\sin\alpha\cos\alpha$, $y^2\delta'\sin\beta\cos\beta$, und nach dem Princip von der Erhaltung der Kraft besteht dann die Grundgleichung

$$c^2\delta\sin\alpha\cos\alpha = x^2\delta\sin\alpha\cos\alpha + y^2\delta'\sin\beta\cos\beta$$

oder $(c^2 - x^2)\,\delta\sin\alpha\cos\alpha = y^2\delta'\sin\beta\cos\beta$.

Da nun nach der bekannten Formel $c = \sqrt{(e:d)}$ die Geschwindigkeiten des Lichtes in verschiedenen Aetherdichten sich umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dichten verhalten, so ist $c : y = \sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta}$; da ferner nach der Lehre von der Brechung $c : y = \sin\alpha : \sin\beta$, so ergibt sich durch Verbindung der beiden Proportionen die neue Proportion $\sqrt{\delta'} : \sqrt{\delta} = \sin\alpha : \sin\beta$ oder $\delta\sin^2\alpha = \delta'\sin^2\beta$. Dividiren wir die Grundgleichung durch die letzte Gleichung, so nimmt jene die Gestalt an

$$(c^2 - x^2)\cot g\,\alpha = y^2\cot g\,\beta.$$

Mittels dieser Gleichung wollen wir untersuchen, unter welchen Umständen nur die zur Einfallsebene senkrechte Componente jeder Schwingung zurückgeworfen wird, wann also von der zweiten Componente jeder Schwingung, welche in der Einfallsebene geschieht, kein Bestandtheil reflectirt wird, oder unter welchen Umständen die Intensität des in der Einfallsebene schwingenden reflectirten Lichtes = Null ist. Dies ist offenbar der Fall, wenn die Geschwindigkeit dieses Lichtes = Null ist; denn wo das Licht keine Geschwindigkeit hat, ist gar kein Licht vorhanden. Zum Zwecke dieser Untersuchung denken wir uns jede Wellenbewegung, die einfallende sowohl, wie die reflectirte und die gebrochene, jede in 2 Componenten, von denen immer die Schwingungen der ersten in der Einfallsebene geschehen und die der zweiten auf derselben senkrecht stattfinden; die Geschwindigkeiten der drei ersten Wellenbewegungen sind $c\cos\alpha$, $x\cos\alpha$ und $y\cos\beta$; und da diese Geschwindigkeiten aus Schwingungen gleicher Richtung resultiren, so ist nach dem Parallelogramm der Kräfte $c\cos\alpha = x\cos\alpha + y\cos\beta$ oder $(c - x)\cos\alpha = y\cos\beta$. Wird die letzte Form der Grundgleichung durch die letzte Gleichung dividirt, so erhält jene die Gestalt

$$(c + x)\sin\beta = y\sin\alpha.$$

Eliminirt man nun y aus den 2 letzten Formen der Grundgleichung, so entsteht $(c - x)\sin\alpha\cos\alpha = (c + x)\sin\beta\cos\beta$, woraus man endlich den Werth für x aufsucht: $x = c(\sin\alpha\cos\alpha - \sin\beta\cos\beta) : (\sin\alpha\cos\alpha + \sin\beta\cos\beta)$

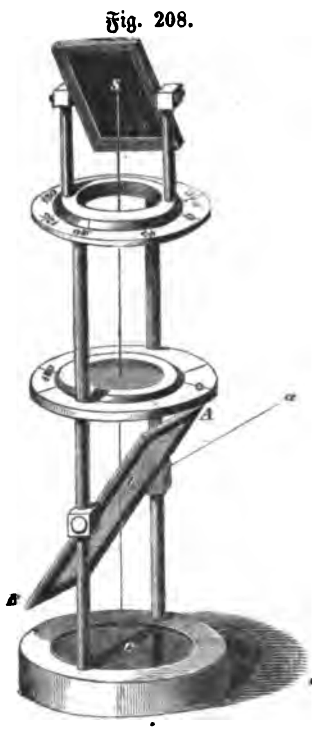
oder $x = \dfrac{c\,\tan g\,(\alpha - \beta)}{\tan g\,(\alpha + \beta)}$, woraus $x\cos\alpha = \dfrac{c\,\tan g\,(\alpha - \beta)\cos\alpha}{\tan g\,(\alpha + \beta)}$.

Dieser Ausdruck für die Geschwindigkeit des Lichtes in der reflectirten Welle, deren Schwingungen in der Einfallsebene stattfinden, wird = Null, wenn $\alpha + \beta = 90^0$ ist; demnach ist kein in der Einfallsebene schwingendes reflectirtes Licht mehr vorhanden, sondern nur auf derselben senkrecht schwingendes oder polarisirtes Licht, oder es ist der reflectirte Strahl vollständig polarisirt, wenn $\alpha_p + \beta_p = 90^0$, d. h. wenn der reflectirte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht. Nach dieser Form des Gesetzes, welche Brewster zuerst aufgefunden, ist der Polarisationswinkel α_p derjenige Einfallswinkel, der durch den zugehörigen Brechungswinkel β_p zu 90^0 ergänzt wird, oder auch derjenige Einfallswinkel, bei welchem der reflectirte und der gebrochene Strahl auf einander senkrecht stehen. Diese Form geht leicht in die obige gewöhnliche Form des Gesetzes über, wenn man in die Brechungsgleichung $\sin\alpha_p = n\sin\beta_p$ den Werth $\beta_p = 90 - \alpha_p$ einsetzt; es ist dann $\sin\alpha_p = n\cos\alpha_p$ oder $\tan g\,\alpha_p = n$. Obgleich hiernach der Polarisationswinkel für verschiedene Farben eine verschiedene Größe haben muß, so kann man doch des geringen Unterschiedes wegen auch weißes Licht für vollständig polarisirt ansehen.

Durch Glas wird demnach das zurückgeworfene Licht vollständig polarisirt, wenn $\tan g\,\alpha_p = {}^3/_2$, wenn also $\alpha_p = 56^0\,19'$, d. h. wenn der Strahl unter einem Winkel von $33^0\,41'$ auf das Glas fällt. Hierauf beruhen verschiedene Polarisationsapparate; wir beschreiben den von Nörremberg (1830) (Fig. 208). AB ist der Polarisationsspiegel (Pola-

riseur), der um 33° 41′ gegen die verticale Achse des Apparates geneigt ist; hierdurch wird ein unter 33° 41′ gegen den Polariseur geneigter Strahl ab in diese Achse nach bc reflectirt und von dem ebenen, belegten Spiegel in der Bodenplatte des Apparates ebenso zurückgeworfen; er geht dann senkrecht aufwärts durch den Polarisationsspiegel nach bs; diese Einrichtung hat den Zweck, fremdes Licht abzuhalten. Nun trifft der Strahl auf den Zerstreuungsspiegel s, der oben drehbar aufgestellt ist. Da dieser Spiegel das polarisirte Licht polarisirt zurückwerfen soll, so muß er ebenfalls den Strahl unter dem Polarisationswinkel aufnehmen, also ebenfalls eine Neigung von 33° 41′ gegen die Verticale haben. Hat der Zerleger die Stellung, daß seine Marke am Nullpunkte steht, so ist er dem Polariseur parallel, die Reflexionsebene fällt mit der Polarisationsebene zusammen, man sieht im Spiegel s den strahlensendenden Gegenstand, das Gesichtsfeld ist hell. Dreht man den Zerleger um 90°, so ist das Gesichtsfeld dunkel; bei der Drehung von 90 bis 180° hellt es sich allmälig wieder auf und erscheint bei 180° wieder ganz hell, da jetzt die Reflexionsebene und die Polarisationsebene wieder zusammenfallen; bei 270° ist das Gesichtsfeld abermals dunkel und bei 360° wieder hell.

Fig. 208.



Die Richtung der Polarisation bezeichnet man durch die Lage der Polarisationsebene; da die Polarisationsebene des zurückgeworfenen Lichtes in der Einfalls- oder Reflexionsebene liegt, so sagt man, der reflectirte Strahl sei in der Reflexionsebene polarisirt. — Die Metalle haben wegen ihres großen B.-E. einen sehr kleinen Polarisationswinkel, erzeugen durch Reflexion so gut wie kein polarisirtes Licht; dagegen ist alles von Glas, Wasser, Luft, Weltkörpern reflectirte Licht theilweise polarisirt, was man durch das allmälige Ab- und Zunehmen der zwei Doppelspathbilder beim Drehen (Malus) oder durch das allmälige Aendern des Nicol-Bildes erkennen kann. Man macht hiervon Anwendung in der Astronomie zu der Untersuchung, ob ein Weltkörper mit eigenem oder mit fremdem Lichte leuchtet. Der Regenbogen, der blendende Glanz von Glas und Wasser, von Gemälden verschwindet beim Betrachten durch einen Nicol oder einen Turmalin. Der blaue Himmel ist in einer Ebene polarisirt, die durch die Sonne, das beobachtende Auge und den fixirten Himmelspunkt geht; hierauf beruht Wheatstones Polaruhr.

377 2. **Polarisation durch Brechung.** Wenn ein Lichtstrahl unter dem Polarisationswinkel auf Glas fällt, so ist der gebrochene Bestandtheil desselben schwach polarisirt; er wird es vollständiger, wenn er nicht durch eine einzige Glasplatte, sondern durch einen Glasstoß geht.

Denn nach dem Beweise in 376. ist, wenn $x \cos \alpha = 0$ ist, die Geschwindigkeit des in der Einfallsebene schwingenden gebrochenen Lichtes $y \cos \beta = c \cos \alpha$, also gleich der ganzen ebenso schwingenden Componente des einfallenden Lichtes; der gebrochene Strahl ist also senkrecht zur Einfallsebene polarisirt. Jedoch können die gebrochenen Componenten der auf das Glas fallenden Schwingungen noch mehr oder minder große Theile der zur Glasfläche parallelen Componenten enthalten und dadurch verschiedene, nicht parallele Richtungen haben; durch je mehr Platten der gebrochene Strahl geht, desto mehr werden diese parallelen Theile durch Reflexion und Absorption beseitigt, desto mehr werden also die durchgehenden Schwingungen senkrecht auf dem gebrochenen Strahle und auf den reflectirten stehen; folglich wird aus einem Glasstoße ein in der Einfallsebene schwingender, also ein senkrecht zu dieser Ebene polarisirter Strahl treten. Ein Glasstoß ist deßhalb sowohl ein Polariseur wie ein Zerleger. Körper, die einen Schichtenbau haben, wie Perlmutter, Achat, liefern beim Durchgehen polarisirtes Licht.

378 3. **Polarisation durch Absorption.** Der Turmalin ist ein doppelt brechender Körper, der die Schwingungen des ordentlichen Strahles absorbirt und

nur die des außerordentlichen durchläßt; das durch eine Turmalinplatte gegangene Licht ist daher polarisirt und zwar senkrecht zum Hauptschnitte. Ist die Oberfläche parallel zur Achse geschliffen, so müssen die durchgehenden Schwingungen der Achse parallel sein.

Ein sehr brauchbarer Polarisationsapparat ist daher die Turmalinzange, eine Zange, federnd aus Draht oder Blech gebogen, die an ihren beiden einander gegenüberliegenden Enden Ringe zur Aufnahme der kreisförmig gefaßten Turmalinplatten trägt und so die Drehung derselben erlaubt. Die eine Platte ist der Polariseur, die andere der Analyseur. Sind die Achsen parallel, so ist das Gesichtsfeld hell, dagegen dunkel, wenn die Achsen einen rechten Winkel bilden. Je dicker der Polariseur ist, desto vollständiger ist das Licht polarisirt, aber desto schwächer ist es auch; die trübe grüne und braune Farbe der Turmalinplatten stellt sie hinter den Nicol zurück. Doch ist die Zange vortrefflich zur Beobachtung der Interferenzerscheinungen des polarisirten Lichtes. — Mittels einer Turmalinplatte kann man auf den Boden von tiefem Wasser sehen.

379 4. Polarisation durch doppelte Brechung. Die Schwingungen jedes ordentlichen Strahles stehen, wie in 373. gezeigt wurde, auf dem Hauptschnitte senkrecht, sind daher einander parallel, der ordentliche Strahl ist in dem Hauptschnitte polarisirt; die Schwingungen des außerordentlichen Strahles liegen in dem Hauptschnitte, sind daher, da sie auf ihrem Strahle senkrecht stehen, einander parallel, der außerordentliche Strahl ist senkrecht zum Hauptschnitte polarisirt. Die beiden Strahlen sind senkrecht gegen einander polarisirt.

Schon Huyghens beobachtete, daß die vier Bilder, welche durch Aufeinandersetzen zweier Doppelspathe entstehen, bei der Drehung allmälig ihre Lichtstärke ändern und in gewissen Lagen bis auf zwei verschwinden. — Jeder doppelt brechende Krystall ist ein Polariseur und ein Analyseur; betrachtet man eine glänzende Fensterscheibe durch einen Doppelspath, so ändern sich bei der Drehung die Intensitäten der beiden Bilder. — Der Nicol ist ein ebenso vortrefflicher Polariseur als Analyseur. — Haidingers dichroskopische Lupe enthält einen Doppelspath zwischen zwei Glasprismen, gefaßt in ein Röhrengehäuse, das am einen Ende eine runde, am anderen eine quadratische Oeffnung trägt, welche man durch die runde Oeffnung zweimal und zwar mit senkrecht gegen einander polarisirtem Lichte sieht. Sie ist bei der Interferenz des polarisirten Lichtes brauchbar. — Rochons Mikrometer besteht aus zwei zusammengekitteten Bergkrystallprismen; die optische Achse des einen steht auf einer Seitenfläche, die des anderen auf der Grundfläche senkrecht. Fällt ein Strahl auf die erste Fläche, so geht er ungebrochen bis zur Trennungsfläche; dort geht nun auch der ordentliche Strahl ungebrochen weiter, während der außerordentliche etwas abgelenkt erscheint; den Ablenkungswinkel kann man nun sowohl aus den Winkeln des zweiten Prismas berechnen, als auch durch Beobachtung finden. Aus der Größe dieses Winkels und aus der Ablenkung der zwei Bilder eines Gegenstandes, welche man durch ein mit dem Mikrometer versehenes Fernrohr sieht, läßt sich die Größe des Gegenstandes berechnen. — Manche organische Körper, wie Horn, Federspule, polarisiren das Licht wie optisch zweiachsige Körper. Auch das Auge scheint ein doppelt brechender Analyseur zu sein; denn nach Haidinger sieht man im polarisirten Lichte zwei blaßgelbe Büschel, gegen die manchmal noch zwei blauviolette in senkrechter Stellung erscheinen; man sieht am Besten durch einen Nicol nach einer hellen Wolke.

380 **Interferenz des polarisirten Lichtes.** Parallel zu einander polarisirte Strahlen, die auf oder neben einander liegen, können sich durch Interferenz aufheben oder verstärken, weil ihre Schwingungen in dieselben Geraden fallen und daher bei entgegengesetzter Bewegung sich aufheben und bei gleicher verstärken; ebenso können in schiefer Richtung gegen einander polarisirte Strahlen gewöhnliche Interferenzerscheinungen hervorrufen, weil ihre Schwingungen parallele Componenten haben; dagegen senkrecht zu einander polarisirte Strahlen interferiren nicht, weil auf einander senkrecht stehende Kräfte eine reelle Resultante haben und keine parallele Componenten enthalten. Da nun gewöhnliche Lichtstrahlen immer interferiren, so ist hier die Annahme geboten, daß ihre Schwingungen nach allen Richtungen auf dem Strahle senkrecht stehen. Senkrecht zu einander polarisirte Strahlen können nur dann interferiren, wenn ihre Schwingungen durch einen Analyseur in parallel oder schief gegen einander gerichtete Componenten zerlegt werden. Hierauf beruhen folgende Erscheinungen:

381 1. Färbung dünner Krystallblättchen (Arago 1811). Dünne Blättchen doppelt brechender Krystalle, welche im gewöhnlichen Lichte farblos durchsichtig sind, erscheinen im polarisirten Lichte in gewissen Lagen lebhaft gefärbt, wenn sie mittels eines Analyseurs betrachtet werden. Die Farbe ist am lebhaftesten, wenn der Hauptschnitt des Blättchens mit der Polarisationsebene einen Winkel von 45° einschließt; bei der Drehung des Blättchens nimmt die Farbe an Intensität ab; bei 0° und 90° ist sie am schwächsten. Die Farbe wird complementär, wenn man den Analyseur um 90° dreht, oder wenn man bei Anwendung eines Glasstoßes das Blättchen im durchgelassenen statt im reflectirten Lichte betrachtet; bei Anwendung eines Doppelspathes oder einer Haidinger'schen Lupe erscheinen die beiden Bilder complementär gefärbt und, wo sie sich decken, weiß. Die Farben sind um so lebhafter, je dünner das Blättchen ist, verschwinden aber bei zu geringer, sowie bei einigermaßen großer Dicke, im Bergkrystall schon bei 1/2 mm. Die Dicke ist um so geringer, je größer der Unterschied zwischen dem ordentlichen und dem außerordentlichen Strahle ist. Die Dicken für verschiedene Farben verhalten sich wie die Wellenlängen; es entstehen also bei ungleicher Dicke bunte Blättchen (Kaleido-Polariskop), keilförmige Blättchen zeigen die Newton'schen Farben in parallelen Streifen.

Erklärung (Young 1814). Am deutlichsten zeigen sich diese Erscheinungen an den rautenförmigen Gypsblättchen vom Montmartre. Legt man ein solches Blättchen auf die Glastafel in dem Ringe bei A (Fig. 208), so daß die Schwingungsebene des heraufsteigenden polarisirten Strahles es in einen der zwei Hauptschnitte des Blättchens fällt, so gehen die Schwingungen unverändert durch auf den Analyseur; dieser erscheint daher bei paralleler Stellung hell, bei gekreuzter dunkel; wenn aber die Schwingungsebene des polarisirten Strahles nicht in einen Hauptschnitt fällt, so wird jeder Strahl durch das Blättchen in zwei senkrecht gegen einander polarisirte Strahlen zerlegt, die an der Oberfläche des Blättchens austretend mit einander zum Analyseur gehen. Auf diesen treffen die beiden Strahlen unter Winkeln von 45°; ihre Schwingungen werden in parallele und senkrechte Componenten zerlegt; die beiden parallelen Componenten wirken ebenso wie die zwei senkrechten auf einander schwächend oder verstärkend ein, je nachdem sie in entgegengesetzten oder gleichen Phasen sind. Die Verschiedenheit der Phasen wird nun dadurch hervorgerufen, daß die zwei in dem Blättchen entstehenden Strahlen eine verschieden starke Brechung erleiden, d. h. mit verschiedener Geschwindigkeit durch das Blättchen gehen. Beträgt z. B. der Unterschied der Wege zweier Strahlen durch das Blättchen 1/2 Wellenlänge des rothen Lichtes, so sind bei paralleler Stellung des Analyseurs die beiden zum Analyseur parallelen Componenten der beiden Schwingungen entgegengesetzt gerichtet, heben sich daher auf; im reflectirten Lichte verschwinden also die rothen Bestandtheile der zwei weißen Strahlen; im durchgelassenen Lichte dagegen verstärken sie sich, weil die beiden senkrechten Componenten gleich gerichtet sind. In demselben Augenblicke aber beträgt der Unterschied der beiden violetten Strahlenbestandtheile nahezu eine ganze Wellenlänge des violetten Lichtes; die beiden dem Analyseur parallelen Componenten der beiden Schwingungen dieses Lichtes sind von gleicher Richtung, sie verstärken sich, während die senkrechten Componenten sich einander aufheben. Wenn also im reflectirten Lichte das Roth verschwindet, bleibt das Violett und in geringerem Grade die anderen Farben; es bleibt daher ein ganz gleiches Gemisch wie bei Newtons erstem Farbenringe. Unter denselben Umständen verschwindet im durchgelassenen Lichte das Violett und bleibt das Roth zurück; das durchgelassene Licht ist also dem reflectirten complementär. Ganz in derselben Weise kehren sich die Erscheinungen bei gekreuzten Spiegeln um, und ebenso erklären sich die complementären Farben der zwei Doppelspathbilder. — Schaltet man zwischen zwei Nicols ein Gypsblättchen ein, läßt ein Lichtbündel durch und zerlegt es durch ein Prisma, so zeigt das Spectrum die Richtigkeit der angegebenen Farbenmischung. In demselben zeigen sich außer den Fraunhofer'schen noch andere dunkle Linien, die Talbot'schen Linien, die Esselbach zur Berechnung der Wellenlänge der ultravioletten Strahlen benutzt hat.

382 2. Farbenringe in dicken Krystallplatten. Schaltet man in die Turmalinzange oder zwischen zwei Nicol'sche Prismen eine dickere Krystallplatte ein, oder legt man eine solche auf die Glasplatte in Nörrembergs Polarisationsapparat und befestigt noch eine Sammellinse über derselben, so sieht man farbige Ringsysteme. In optisch einachsigen Krystallen, senkrecht zur Achse geschnitten, erscheinen bei ge-

kreuzter Analyseurstellung farbige Ringsysteme mit einem schwarzen Kreuze, bei paralleler Analyseurstellung Kreissysteme in den complementären Farben mit einem hellen Kreuze. In optisch zweiachsigen Krystallen, die senkrecht zur Mittellinie geschnitten sind, d. h. zu der Linie, welche den Winkel der beiden optischen Achsen halbirt, erscheinen zwei Ringsysteme, die elliptisch und lemniskatisch verbunden sind und von schwarzen Hyperbeln oder Kreuzen durchzogen werden; auch hier kehren sich Farbe und Licht um bei paralleler Analyseurstellung. Ist der Achsenwinkel zu groß, so ist nur ein Ringsystem sichtbar, das von einem dunkeln oder hellen Streifen durchschnitten wird. Um beide Ringsysteme sichtbar zu machen, und um die Erscheinung deutlicher und ungestörter wahrnehmen zu können, dient Nörrembergs mikroskopischer Polarisationsapparat, welcher über und unter der Platte die Strahlen concentrirende Linsensysteme enthält und als Analyseur einen Nicol trägt. Mittels der zwei Ringsysteme läßt sich der Winkel der zwei optischen Achsen auffinden (Stauroskop von Kobell). In manchen Krystallen hat die optische Achse für verschiedene Farben eine sehr verschiedene Lage; dann sind die Systeme nur im homogenen Lichte deutlich, im weißen dagegen ganz verwischt und die schwarzen Streifen mit farbigen Säumen versehen (Seignettesalz, Titanit). Krystalle, die parallel zur Achse geschliffen sind, erscheinen im weißen polarisirten Lichte nur hell und dunkel; im homogenen Lichte zeigen sie hyperbolische Streifen. Gepreßte, schnell gekühlte und tönende Gläser verhalten sich in polarisirtem Lichte wie doppeltbrechende Krystalle. Alle diese Farbensysteme lassen sich durch Anwendung von Linsen auch im Großen auf einem Schirme darstellen und bilden dann prachtvolle Erscheinungen.

Zur Erklärung muß man ins Auge fassen, daß in ein Auge, das auf die Mitte einer Platte hinsieht, von dieser Mitte aus Strahlen kommen, die auf der Platte senkrecht stehen, von den Seiten rings um die Mitte her aber solche Strahlen, die schief durch die Platte gegangen sind und deren Länge innerhalb der Platte daher verschieden, in gleicher Entfernung rings um die Mitte dagegen dieselbe ist. Wenn eine einachsige Platte senkrecht zur Achse geschnitten ist, so geht durch die Mitte ein polarisirter Strahl unverändert durch; bei gekreuzter Analyseur-Stellung ist daher die Mitte dunkel. Seitlich nach dem Auge gehende Strahlen werden aber zerlegt und die zwei Bestandtheile ungleich stark gebrochen, der eine gewöhnlich, der andere ungewöhnlich, so daß sie nicht zusammen aus der Platte treten; indessen wird doch mit jedem gewöhnlichen Strahle ein ungewöhnlicher austreten, die aber wegen der verschiedenen Wellenlänge der beiden Strahlen im Allgemeinen in ungleicher Phase sein müssen. Beträgt der Unterschied an irgend einer Stelle eine ganze Wellenlänge des violetten Lichtes und werden diese Strahlen durch den kreuzenden Analyseur ins Auge gebracht, so heben sich die parallelen Componenten auf, das Violett verschwindet aus dem reflectirten Lichte; an derselben Stelle beträgt dann der Unterschied für das Roth nur $1/2$ Wellenlänge, die parallelen Componenten fallen dann bei gekreuzter Stellung in eine Richtung, das Roth ist verstärkt. Es treten hier wieder die Newton'schen Farben auf. Für alle Punkte, die gleich weit von der Mitte entfernt sind, ist die Erscheinung immer dieselbe, wodurch sich die Kreisform erklärt. Das schwarze Kreuz entsteht durch die Strahlen, welche, weil ihre Schwingungen in den nach der Mitte gehenden Hauptschnitt oder senkrecht zu demselben fallen, unzerlegt durchgehen und daher wie reines polarisirtes Licht durch den kreuzenden Analyseur verlöscht, bei parallelem Analyseur dagegen unverkürzt reflectirt werden, und so im letzten Falle ein helles Kreuz bilden.

3. Die circulare Polarisation (Fresnel 1817.) Wenn senkrecht zu einander polarisirte Lichtstrahlen auf einander fallen, deren Phasenunterschied Null oder eine beliebige Anzahl von halben Wellenlängen beträgt, und welche gleiche Schwingungszeiten haben, so entstehen immer geradlinige Schwingungen, weil das betreffende Aethertheilchen durch die schwingende Kraft der beiden Strahlen immer um proportionale Strecken von den beiden Schwingungsrichtungen abgedrängt wird. Sind aber die beiden Strahlen in der Phase um $1/4$ Wellenlänge verschieden, so erhält das Theilchen in dem Momente, wo es durch eine Schwingung die stärkste Bewegung, gleich der Amplitude dieser Schwingung, erhält, durch die andere gar keine Bewegung; wenn es nun am Ende der Amplitude angelangt ist, kehrt es langsam **383**

in derselben zurück; in demselben Momente erhält es durch die andere Schwingung den stärksten Stoß, vermöge dessen es stark in senkrechter Richtung von der ersten Richtung abweicht, während es in dieser Richtung selbst langsam zurückkehrt; aus diesen zwei Bewegungen resultirt ein Weg, der in seinem ersten Elemente auf der ersten Richtung senkrecht steht, aber allmälig von dieser senkrechten Richtung abweicht, also eine krumme Linie bildet. Nun aber wird die Geschwindigkeit in der ersten Richtung immer größer, während die in der zweiten abnimmt; es wird daher das Theilchen immer mehr die erste Richtung einschlagen und immer mehr von der zweiten verlieren, seine Bahn muß immer mehr der ersten Richtung parallel, also zur zweiten senkrecht werden, bis nach $1/4$ Schwingungszeit seine Geschwindigkeit in der ersten Richtung am größten, in der zweiten gleich Null geworden ist und nun das Theilchen vom Ausgangspunkte der Bewegung gerade so weit entfernt ist als am Beginne dieses Viertels der Schwingungszeit. Offenbar hat das Theilchen bei gleicher Amplitude beider Schwingungsarten einen Viertelkreis beschrieben, und ebenso offenbar wird es in der ganzen Schwingungszeit einen ganzen Kreis beschreiben. Sind also die zwei rechtwinklig zu einander polarisirten Strahlen um $1/4$ Wellenlänge verschieden, so entsteht ein kreisförmig polarisirter Strahl. Ebenso ergibt sich, daß ein elliptisch polarisirter Strahl entsteht, wenn der Unterschied zwischen 0 und $1/4$, zwischen $1/4$ und $1/2$ u. s. w. Wellenlänge liegt. Wenn nun in einem Strahle sämmtliche Theilchen Ellipsen beschreiben, so bildet die Verbindungslinie aller Aetheratome nicht eine ebene Welle, sondern eine Schraubenlinie, weil jedes folgende Theilchen in seiner Ellipse ein wenig weiter zurück ist und erst das letzte Aetheratom in der Welle die gleiche Lage wie das erste besitzt. In ähnlicher Weise hat Fresnel die circulare Polarisation theoretisch entdeckt und ihre Gesetze auf mathematischem Wege entwickelt. Auf derselben beruhen folgende Erscheinungen:

1. Während ein Glimmerblättchen, das zwei senkrecht zu einander polarisirte Lichtstrahlen liefert, deren Phasenunterschied ein Vielfaches von $1/2$ Wellenlänge beträgt, im homogenen Lichte bei paralleler oder gekreuzter Stellung dunkel erscheint, je nachdem das Vielfache gerad oder ungerad ist, — bleibt es in jeder Stellung des Analyseurs unverändert hell, wenn die Dicke so gering ist, daß der Phasenunterschied $1/4$, $3/4$, $5/4$ .... einer Wellenlänge ausmacht (circulare Polarisation), — und wechselt es in seiner Lichtstärke, ohne jedoch dunkel zu werden, wenn der Phasenunterschied zwischen den ungeraden und den geraden Vierteln liegt (elliptische Polarisation). Liefert ein Glimmerblättchen circular polarisirtes Licht für eine Farbe, so wird es näher liegende Farben elliptisch, entferntere geradlinig polarisiren; nur ein Blättchen, das Gelb circular polarisirt, wird dies auch nahezu für Weiß thun.

2. Wird ein polarisirter Strahl (z. B. durch ein auf die Glasplatte des Polarisationsapparates gelegtes Prisma) total reflectirt, so wird er depolarisirt, d. h. er wird in zwei senkrecht zu einander polarisirte Strahlen zerlegt, die um einen kleinen Bruchtheil ($1/8$) einer Wellenlänge von einander verschieden sind und sich daher zu einem elliptisch polarisirten Strahle interferiren; bei zweimaliger totaler Reflexion entsteht circulare Polarisation (Fresnels Parallelopiped). Auch durch metallische Reflexion wird polarisirtes Licht in elliptisch und circular polarisirtes Licht verwandelt, Jamin (1847).

384 3. Legt man eine senkrecht zur Achse geschliffene Quarzplatte von 1mm Dicke in den Polarisationsapparat bei paralleler Stellung des Analyseurs, so muß man bei rothem Lichte den Analyseur 19° weiter drehen, um das Maximum der Lichtstärke zu erhalten, und ebenso 19° über 90° und 270° hinaus, um Dunkelheit zu erlangen; bei Gelb beträgt die Drehung 24°, bei Blau 32°, bei Violett 40°. Hieraus folgt einfach, daß im weißen polarisirten Lichte die Platte farbig erscheint, und daß die Farben, obwohl Mischfarben, bei der Drehung wie die prismatischen auf einander folgen. Muß man für den Uebergang von Roth in Gelb u. s. w. den Analyseur rechts drehen d. h. im Sinne der Uhrzeigerbewegung, so hat man einen rechts drehenden Krystall, im anderen Falle einen links drehenden Krystall. Die Drehung wächst mit der Dicke der Platte und ist nahe dem Quadrat der Wellenlänge umgekehrt proportional (Biots Gesetz 1819). Der Quarz hat also die Eigenschaft, die Ebene der Schwingungen des polarisirten Lichtes oder auch die Polarisationsebene zu drehen und zwar für verschiedene Farben

um einen verschiedenen Winkel und proportional zur Dicke der Platte. Diese Erscheinung hat Fresnel durch den Nachweis erklärt, daß in einer Quarzplatte sich ein polarisirter Strahl in zwei circular polarisirte Strahlen zerlegt, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, aber gleiche Intensität, gleiche Umlaufzeit und entgegengesetzte Rotation haben. Diese beiden circular polarisirten Strahlen werden durch den Analyseur wieder vereinigt zu einem geradlinig polarisirten Strahle, dessen Schwingungen gegen die des ursprünglichen polarisirten Strahles verdreht sind, weil die neue geradlinige Schwingung immer die Mitte zwischen den Stellungen der schwingenden Moleküle in den zwei Kreisen annimmt, und weil in diesen Kreisen das eine Molekül sich weiter vom Ausgangspunkte der Bewegung entfernt hat als das andere. Ob die Drehung der Schwingungsebene oder auch der Polarisationsebene nach links oder nach rechts stattfindet, hängt davon ab, welche der zwei Kreisbewegungen die schnellste ist; leicht ergibt sich auch, daß die Größe der Drehung mit der Farbe verschieden und der Dicke proportional ist. Bringt man eine Quarzplatte in der Turmalinzange oder in dem mikroskopischen P.-A. vors Auge, dann gelangen nicht blos senkrechte Strahlen, welche die eben erwähnten Farben erzeugen, ins Auge, sondern auch rings um die Mitte gleich gelagerte schiefe Strahlen; es entsteht alsdann bei gekreuzter Analyseurstellung nicht ein schwarzer Fleck, sondern ein farbiger Kreis, von Farbenringen umgeben, in denen erst weiter nach außen die Reste des schwarzen Kreuzes auftauchen. Es gibt rechts und links drehende Quarzplatten; zwei nach entgegengesetzter Richtung drehende Platten geben eine schöne Verschlingung farbiger Spiralen mit farbigen Kreisen.

Außer dem Quarz haben von den festen Körpern das chlorsaure und das bromsaure Natron, das doppelt essigsaure Uranoxydnatron und ein Hydrat von Schwefelantimonschwefelnatrium die Eigenschaft, die Polarisationsebene zu drehen; und zwar ist diese Eigenschaft bei diesen regulären Krystallen in jeder Richtung vorhanden, verschwindet aber in ihren Lösungen. Der Zinnober dreht dreimal so stark als der Quarz und ein Strychninsulfat behält seine linke Drehung auch in der Lösung in geringerem Maße. Sehr häufig findet sich die Fähigkeit der Drehung bei den flüssigen Körpern. Manche Flüssigkeiten verlieren die Drehungsfähigkeit, wenn sie krystallinisch fest werden, jedoch nicht, wenn sie in den glasig amorphen Zustand übergehen. Links drehend sind: Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser, Gummilösung u. A.; rechts drehend sind: Zuckerlösung, Citronenöl u. A.; doch muß das Licht bei den Flüssigkeiten durch eine lange Säule gehen, um eine einigermaßen meßbare Drehung hervorzurufen; diese Drehung ist z. B. bei Zuckerlösung dem Gehalte an Zucker proportional. Hierauf beruht das Saccharometer (σάκχαρ, Zucker) (Biot 1840), das zum Messen des Zuckergehaltes durch Drehung der Polarisationsebene dient. Zu diesem Zwecke ist ein Mittel nöthig, wodurch schon kleine Drehungen merkbar werden. Dies ist die doppelte Quarzplatte von Soleil; sie besteht aus zwei an einander gekitteten entgegengesetzt drehenden Platten von 3,75mm Dicke, wodurch sie zwischen zwei parallel gestellten Nicols purpurviolett erscheint, eine Farbe, die bei der geringsten Drehung in Blau der einen und Roth der anderen Platte übergeht und deßhalb Uebergangsfarbe (teinte de passage) genannt wird. Wird nun zwischen die zwei Nicols ein die Polarisationsebene drehender Körper eingeschoben, so wird die Uebergangsfarbe geändert; durch die Größe der Drehung, die man dem einen Nicol ertheilen muß, um die Uebergangsfarbe wieder herzustellen, wird das Drehvermögen und dadurch der Zuckergehalt einer Lösung gemessen. Bei Soleils Saccharometer wird statt der Drehung des einen Nicol eine keilförmige Quarzplatte vor- oder rückwärts geschoben, und durch ihr Drehungsvermögen, das dem des Zuckers entgegengesetzt ist, wird diese Drehung aufgehoben und die durch den Zucker veränderte teinte de passage wiederhergestellt. Aus der Größe der Verschiebung, die an einem mit Nonius versehenen Maßstabe auf der Fassung des Keiles ersichtlich ist, wird der Zuckergehalt berechnet.

Die Farbenharmonie (Chevreul 1830, Brücke 1866). Die Farbenharmonie bezeichnet eine dem Auge wohlgefällige Zusammenstellung der Farben in den Werken der Kunst, der Industrie, des gewöhnlichen Lebens. Indessen ist trotz zahlreicher Versuche keine Farbenharmonielehre zu allgemeiner Geltung gekommen, und selbst die wenigen Grundsätze, welche die ältere Physik aufstellte, werden nicht blos von der Praxis, sondern in letzter Zeit auch von der Theorie angefochten. Jene Grundsätze beruhen auf der Thatsache, daß ein Auge bei längerer Betrachtung für eine Farbe ermüdet und daher auch durch die Fortdauer der Farbe unangenehm berührt wird, daß es aber für die complementäre Farbe dann nicht ermüdet ist und daher von derselben angenehmer berührt wird; außerdem leiden neben einander stehende complementäre Farben nicht durch den Contrast, sondern heben sich sogar, weil durch 385

die Contrastwirkung der einen Farbe die andere erzeugt wird, während nicht complementäre Farben durch Ermüdung für den gemeinschaftlichen Bestandtheil an Sättigung einbüßen oder, was dasselbe ist, durch Zumischung der complementären Farben verändert und weißlich werden. Deßhalb hat man seit alter Zeit die Zusammenstellung complementärer Farben für die vollkommenste Farbenharmonie gehalten, und wirklich gibt es wohl kaum einen angenehmeren Anblick, als die zwei Bilder dünner Gypsblättchen, die ein großer, objectiver Polarisationsapparat hervorruft, oder die durch Brückes Schistoskop (1866) (σχίζω, spalten) erzeugt werden. Und doch halten Manche die Zusammenstellung homogener Farben für zu grell, grob und bäuerisch (Schiffermüller). Brücke erklärt dies dadurch, daß die Farben entweder nicht richtig getroffen oder daß sie in ungeeigneten Materialien ausgeführt seien; die Farben müssen, um angenehm zu wirken, nicht blos dem Tone, sondern auch der Sättigung und Helligkeit nach mit den Ergebnissen des Schistoskops übereinstimmen. Brücke hält deßhalb an den Complementärfarben fest; indessen wäre bei ausschließlicher Anwendung derselben die Zahl angenehmer Farbenpaare zu klein und gibt es außerdem allgemein anerkannte Verbindungen von zwei, drei und mehr Farben, welche angenehm wirken, ohne complementär zu sein. Obwohl man die Ursache solcher Wirkungen nicht kennt, so hat doch Brücke alle guten und schlechten Combinationen zusammengestellt, ohne indeß ein allgemeines, alle Thatsachen beherrschendes Gesetz ausfindig machen zu können.

Das Schistoskop besteht aus einem Nicol'schen Prisma als Polariseur und einer Haidinger'schen Lupe als Analyseur, durch welche man auf eine weiße oder farbige Tafel sieht, während zwischen beiden Gypsblättchen aufgelegt sind; durch Veränderung der Zahl oder Dicke derselben kann man die Farben mannichfach variiren. — Chevreul unterscheidet sechs Farbenharmonieen, denen folgende Benennungen zu Grunde liegen. Alle Abstufungen, welche durch Zumischung von Weiß und von Schwarz zu einer Farbe entstehen, also die verschiedenen Sättigungs- und Helligkeitsgrade bilden eine Skala, in welcher die ersten Tinten, die letzten Schattirungen heißen; die Beifügung von Schwarz, welche bekanntlich auch durch Zumischung von Farbstoffen mittels der Absorption bewirkt wird, gibt jeder Farbe einen grauen Charakter; die Schattirungen werden deßhalb auch gebrochene Farben oder Graue genannt. Durch Zumischung geringer Mengen anderer Farben oder Töne zu einer reinen Farbe entstehen Abtönungen oder Nüancen. Die sechs Harmonieen können in zwei Abtheilungen zerlegt werden, in analoge Harmonieen und Contrastharmonieen. Zu den ersteren gehören: 1) die Harmonie der Skala, hervorgebracht durch den gleichzeitigen Anblick verschiedener Tinten und Schattirungen einer und derselben Farbe. 2) Die Harmonie der Abtönungen, bestehend aus gleichen Tinten und Schattirungen von benachbarten Tönen; 3) Die Harmonie eines vorherrschend gefärbten Lichtes, hervorgebracht durch verschiedene Farben, die nach den Gesetzen des Contrastes verbunden sind, aber durch eine derselben beherrscht werden, was z. B. stattfindet, wenn man Farben durch ein schwach gefärbtes Glas betrachtet. Zu den Harmonieen des Contrastes werden gerechnet: 4) die Contrastharmonie der Skala, hervorgebracht durch zwei weit von einander entfernte Abstufungen derselben Skala; 5) die Contrastharmonie der Abtönungen, hervorgebracht durch solche Farben benachbarter Skalen, welche in der Skala eine sehr verschiedene Höhe haben; 6) die Contrastharmonie der Farben, bewirkt durch Farben entfernter Skalen; der Unterschied kann noch verstärkt sein durch den Höhenunterschied in jeder Skala. Brücke faßt die ersten drei Verbindungen als kleine Intervalle, die letzten drei als große Intervalle. Chevreul unterscheidet noch leuchtende Farben: Gelb, Orange, Roth und Lichtgrün, und dunkle Farben: Blau und Violett. Durch Zusammenstellung mit Weiß gewinnen alle Farben, aber nicht in gleich angenehmer Art; bei den dunkelsten Farben ist der Contrast des Tones, bei den hellsten der Glanz in Verbindung mit Weiß zu stark, Schwarz bildet mit den dunkeln Farben analoge, mit den leuchtenden Farben Contrastharmonieen; durch Zusammenstellung mit Grau gewinnen alle Farben an Reinheit und Glanz.

Siebente Abtheilung.

Die Lehre von der Wärme.

1. Definitionen der Wärmelehre.

Begriff und Wesen der Wärme (Melloni 1835, Mayer 1841). Im gewöhnlichen Leben versteht man unter Wärme die Kraft, welche in unserem Körper Empfindungen erweckt, die wir mit den Ausdrücken heiß, warm, lau, kühl, kalt bezeichnen. Heiß, warm nennen wir einen Körper, wenn er uns sehr viel oder viel Wärme abgibt, lau, wenn wir keine Wärme von ihm empfangen, kühl, kalt, wenn er uns Wärme entzieht; das letzte ist der Fall, wenn wir wärmer sind als der Körper, das erste, wenn der Körper wärmer ist als wir. Wir empfangen alsdann nicht blos Wärme von ihm durch Berührung, sondern auch durch blose Annäherung, selbst wenn zwischen uns und ihm ein luftleerer Raum ist. Die Wärme, die wir durch Berührung empfangen, können wir auch erhalten, wenn wir den warmen Körper mit einem anderen berühren; wir empfangen sie aber dann erst, wenn der zweite Körper selbst warm geworden ist, was längere Zeit andauert; wir nennen diese langsam von Körper zu Körper fortschreitende oder geleitete Wärme auch Körperwärme. Die Wärme dagegen, die wir bei der Annäherung selbst durch den leeren Raum hindurch empfinden, aber auch durch die Luft und durch andere Körper, pflanzt sich blitzschnell durch den leeren Raum und die Körper fort, wie sich z. B. die Wärme der hinter Wolken hervortretenden Sonne sofort hinter einem Fenster fühlbar macht; sie pflanzt sich fort, ohne den leeren Raum oder die Körper, durch welche sie geht, zu erwärmen; wir nennen sie strahlende Wärme. Strahlende Wärme tritt mit Licht verbunden, wie auch ohne Licht auf; man unterscheidet also leuchtende und dunkle strahlende Wärme. 386

Die strahlende Wärme besteht aus transversalen Aetherschwingungen; die Körperwärme aus Molekularbewegungen der Körper.

Daß die strahlende Wärme aus transversalen Aetherschwingungen besteht, also dem Lichte identisch ist, folgerte Melloni aus dem ganz gleichen Verhalten der strahlenden Wärme und des Lichtes. Die strahlende Wärme pflanzt sich in einem isotropen Medium nach allen Richtungen in geraden Linien fort, die man Wärmestrahlen nennt; die Fortpflanzung geschieht im leeren Raume und in der Luft mit derselben Geschwindigkeit wie beim Lichte. Die Wärmestrahlen werden von glatten Flächen nach dem Reflexionsgesetze zurückgeworfen, von rauhen diffundirt, von durchsichtigen nach dem Brechungsgesetze abgelenkt. Strahlen von verschieden hohen Schwingungszahlen, die man auch Wärmefarben nennt, werden von verschiedenen Körpern in verschiedener Weise durchgelassen, absorbirt und diffundirt. Die Wärmestrahlen zeigen wie die Lichtstrahlen die Erscheinungen der Interferenz, der doppelten Brechung, der Polarisation, ja (nach Knoblauch 1865) sogar der circularen Polarisation. Dadurch ist ihre Identität mit Lichtstrahlen zweifellos; die dunkeln Wärmestrahlen, wenigstens die der Sonne, liegen zwischen 60 und 400 Billionen, die leuchtenden gehen bis zu 800 Billionen Schwingungen.

Daß die Körperwärme aus Molekularbewegungen besteht, nicht aber, wie man früher annahm, ein abstoßender, höchst feiner, alles durchdringender Stoff ist, dafür lassen sich folgende Gründe anführen: 387

1. Die Verwandlung von strahlender Wärme in Körperwärme und von Körperwärme in strahlende Wärme. Fallen auf einen Körper Wärmestrahlen, so wird seine Temperatur erhöht, d. h. es wird Körperwärme erzeugt; umgekehrt sendet jeder Körper fortwährend Wärmestrahlen nach allen Richtungen aus. Nun ist es aber nicht möglich, daß sich Stoff in Bewegung und Bewegung in Stoff verwandele; was aus Bewegung entsteht, muß wieder Bewegung sein, und umgekehrt, was Bewegung erzeugt, muß ebenfalls Bewegung sein; so verlangt es nicht blos das Princip der Erhaltung der

Kraft, sondern auch tagtägliche, tausendfältige Erfahrung. Folglich muß die aus der Bewegung der strahlenden Wärme entstehende, und umgekehrt, die Bewegung der strahlenden Wärme erzeugende, Körperwärme ebenfalls Bewegung sein.

2. Die Erzeugung einer unbegrenzten Wärmemenge aus begrenzter Stoffmenge durch Bewegung. Rumford ließ (1798) einen stumpfen Stahlmeißel fest auf den Boden eines Kanonenrohres, das in einem mit Wasser gefüllten Kasten stand, aufpressen und das Rohr durch einen Pferdegöpel drehen; das Wasser kam bald zum Kochen und kochte, so lange die Bewegung dauerte, obwohl von außen her unmöglich Wärme zutreten konnte. Man könnte diesen Versuch jahrelang fortsetzen, immer neues Wasser allmälig zugießen, um das verdampfte zu ersetzen, und würde so eine unbegrenzte Wärmemenge aus dem begrenzten Meißel und Kanonenrohr erhalten. Dieser Versuch ist undenkbar, wenn die Wärme ein Stoff ist, weil eine begrenzte Stoffmenge unmöglich eine unbegrenzte Wärmestoffmenge entwickeln kann. Dagegen wird bei diesem Versuche dem Apparat fortwährend Bewegung, lebendige Kraft zugeführt und fortwährend Wärme an Stelle derselben gewonnen, folglich muß die Wärme selbst Bewegung sein.

3. Die Aequivalenz von Wärme und Arbeit. Eine Wärmeeinheit oder Calorie (1^c) ist diejenige Wärmemenge, welche nöthig ist, um die Temperatur von 1^{kg} Wasser um 1^0 zu erhöhen. Das mechanische Aequivalent der Wärme-Einheit ist 424^{mk} d. h. wenn 1^c in Arbeit verwandelt wird, so entstehen immer 424^{mk} und wenn 1^{mk} Arbeit in Wärme verwandelt wird, so entsteht immer $^1/_{424}{}^c$. Was sich so regelmäßig in einander verwandelt, unter allen Umständen in denselben Mengenverhältnissen, muß innerlich einander gleich sein; die Arbeit nun ist Bewegung, folglich muß die Wärme auch Bewegung sein. Das mechanische Aequivalent der Wärme wurde schon annähernd von Rumford aus den Ergebnissen seines Versuches berechnet. Mayer nahm (1842) die Rechnung wieder auf, benutzte aber die Thatsache, daß zur Erwärmung von Luft, die während der Erwärmung unter dem äußeren Luftdrucke steht, also denselben überwinden muß, 1,41 mal so viel Wärme nöthig ist, als zur Erwärmung von Luft, die in ein constantes Volumen eingeschlossen ist. Die ausgedehntesten Versuchsrechnungen stellte Joule (1843—1850) an; er preßte Wasser durch capillare Röhren und bestimmte die durch Reibung hierbei erzeugte Wärmemenge; er stellte einen Metallbehälter in eine abgemessene Wassermenge, preßte mittels einer Compressionspumpe Luft bis zu 22^{at} in den Behälter und maß dann die Temperaturzunahme, welche durch das Zusammendrücken der Luft hervorgebracht wurde. Er ließ durch an Schnüren hängende, fallende Gewichte zwei auf Frictionsrollen ruhende Achsen in Drehung versetzen, auf denen große Rollen saßen; durch Umdrehung derselben wickelten sich Schnüre von einer Trommel ab, welche mit sich eine verticale Welle drehte, an der im Inneren eines Kastens Schaufelarme befestigt waren. Der Kasten war mit Wasser oder Quecksilber oder Wallrathöl gefüllt und gegen Verlust und Zuführung von Wärme geschützt; Joule konnte durch die Temperaturerhöhung der von den Schaufelarmen geschlagenen Flüssigkeiten und den Fall der Gewichte den Zusammenhang zwischen Wärme und Arbeit berechnen. Auch die Reibung fester Körper benutzte Joule zu dieser Berechnung; an die verticale Welle wurde statt der Schaufeln ein kegelförmiges Stück Gußeisen befestigt, das gegen ein anderes kegelförmig ausgehöhltes Gußeisenstück gepreßt und dann in der erwähnten Weise gedreht wurde, während der Kasten mit Quecksilber gefüllt war; durch die Reibung der beiden Gußeisenstücke an einander entstand Wärme, deren Menge aus der Temperaturzunahme des Quecksilbers gefunden werden konnte. Alle diese verschiedenen Methoden ergaben dasselbe Resultat. Seit Joule sind noch mancherlei Versuche unternommen worden, welche sämmtlich ebenfalls denselben Werth ergaben, den Redtenbacher, Clausius, Person u. A. auch aus theoretischen Betrachtungen ableiteten. Hirn fand (1865) dieselbe Zahl durch Stoßversuche; er ließ ein Eisenpendel gegen ein Holzpendel schlagen, das einen hohlen Bleicylinder trug, dessen Erwärmung durch sofort nach dem Stoße eingefülltes Wasser erkannt wurde. — Dieselbe Zahl ergaben auch umgekehrte Versuche, welche nämlich die Arbeit zu bestimmen suchten, die von einer Calorie geleistet wird. Hirn (1858) berechnete die Wärmemenge, die in dem Dampfe enthalten war, welcher auf eine hundertpferdige Dampfmaschine wirkte; nach der Wirkung wurde der Dampf condensirt und die in dem Wasser noch vorhandene Wärmemenge berechnet; es ergab sich, daß die Wärmemenge geringer war, denn sie war zur Arbeit verbraucht worden, deren Größe man durch das Bremsdynamometer ermittelt hatte; es ergab sich, daß an Stelle jeder verschwundenen Calorie 424^{mk} Arbeit entstanden waren.

4. Wenn bei einer Veränderung keine Arbeit geleistet oder verbraucht wird, so wird auch keine Wärme erzeugt oder verbraucht. Joule (1845) hatte in einem Gefäße Luft von 22^{at} und ließ dieselbe durch Oeffnen eines Hahnes in ein anderes luftleeres Gefäß strömen; da diese strömende Luft keinen Druck zu überwinden hat, so leistet sie keine Arbeit und verzehrt keine; es ist aber auch weder eine Erniedrigung noch eine Erhöhung der

Temperatur bemerkbar. Wäre die Wärme ein Stoff, so müßte bei diesem Versuche die Dichte des Stoffes d. i. die Temperatur vermindert werden. Da dieses nicht stattfindet, so spricht dieser Versuch ebenso gegen die Stofftheorie der Wärme, wie er für die Identität derselben mit Arbeit, mit Bewegung entscheidet.

Die so eben vorgetragene Ansicht über das Wesen der Wärme sammt den zu Grunde liegenden Thatsachen und den sich daraus ergebenden Folgerungen nennt man die mechanische Wärmetheorie.

388 **Die Art der Bewegung, die wir Wärme nennen** (Clausius 1857). Daß die Wärme eine Molekularbewegung ist, kann nach dem Vorausgehenden nicht mehr zweifelhaft sein. Die Intensität der Wärme oder die Temperatur ist durch die Heftigkeit der Bewegung, d. i. die lebendige Kraft der Moleküle bedingt. Die absolute Temperatur d. i. die Temperatur von dem Punkte an gerechnet, wo ein Körper gar keine Wärme enthält, wo also seine Moleküle in Ruhe und unmittelbarer Berührung sind, ist der lebendigen Kraft der Moleküle proportional. Der Zustand, in welchem die Moleküle eines Körpers keine Bewegung haben und sich unmittelbar berühren, ist der absolute Nullpunkt, der Punkt absoluter Kälte; er liegt (nach später folgender Berechnung) bei — 273° C. Die Wärmemenge, die ein Körper bei einer beliebigen Temperatur enthält, besteht nicht blos aus der gesammten lebendigen Kraft aller seiner Moleküle, sondern auch aus der Arbeit in Wärme ausgedrückt, welche nöthig war, um die Moleküle und Atome in die bei dieser Temperatur stattfindende Entfernung von einander zu bringen, um durch Ueberwindung der molekularen Anziehung dem Körper seine jetzige Disgregation zu verleihen. Die erste Wärmemenge, der Wärme-Inhalt und die letztere, die innere Arbeit des Körpers, bilden zusammen die Energie desselben. — Ueber die Art der Molekularbewegung bei den verschiedenen Körpern sind die Forscher noch nicht einig, doch gewinnt die Ansicht von Clausius immer mehr Ausbreitung. Nach dieser haben die Moleküle fester Körper eine schwingende Bewegung um ihre stabile Gleichgewichtslage; die Moleküle flüssiger Körper haben eine so starke schwingende Bewegung, daß ein Molekül, z. B. durch einen Stoß der Nachbarmoleküle, jeden Augenblick im Begriffe ist, seine Gleichgewichtslage zu verlassen, um dann zu anderen Molekülen in dieselbe labile Gleichgewichtslage zu kommen; die Moleküle der Luftarten sind dagegen in fortschreitender Bewegung, welche sie so lange in gerader Linie fortsetzen, bis sie gegen ein anderes Molekül oder gegen eine feste Wand stoßen, um dann eine andere gerade Richtung einzuschlagen. Bei den festen Körpern sind die Moleküle einander am nächsten; daher ist die Anziehung derselben gegen einander sehr stark und in stabilem Gleichgewichte mit ihrer lebendigen Kraft; bei den flüssigen Körpern sind die Moleküle weit von einander entfernt, die Anziehung ist geringer und in leicht veränderlichem, labilem Gleichgewichte mit der lebendigen Kraft der Moleküle; in den Luftarten endlich sind die Moleküle sehr weit von einander entfernt, ihre Anziehung ist daher verschwindend klein und weit überwogen durch die lebendige Kraft der fortschreitenden Molekularbewegung.

Wir haben aus dieser Hypothese die Grundeigenschaften der flüssigen und luftförmigen Körper (s. 53.—55., sowie 152. und 184.) in einfachster Weise abgeleitet; ebenso ergeben sich alle Wärme-Erscheinungen einfach aus derselben, wodurch sie sehr an Wahrscheinlichkeit gewinnt. Andere Hypothesen wurden aufgestellt von Redtenbacher, der die Wärme in radialen Schwingungen der Aetheratome sucht, von Davy und Rankine, welche sie als eine Rotationsbewegung der Körpermoleküle betrachten, von Wiener, der sie aus Schwingungen der Körper- und Aetheratome bestehen läßt u. s. w. — Indessen ist auch in der Theorie von Clausius die Bewegungsart nicht so einfach, wie es oben für den Anfänger dargestellt wurde; bei den Molekülen der festen Körper könnten, meint Clausius, auch drehende Bewegungen vorkommen und die Atome eines Moleküls könnten in den verschiedenartigsten Bewegungen innerhalb des Moleküls begriffen sein; in den flüssigen Körpern seien diese Bewegungen der Bestandtheile der Moleküle ebenfalls vorhanden neben der schwingenden, wälzenden und fortschreitenden Bewegung derselben; für die Gasmoleküle berechnet Clausius, daß die lebendige Kraft der fortschreitenden Bewegung nur 63% ihres

Wärme-Inhaltes ausmache, und daß der Rest des Wärme-Inhaltes in der lebendigen Kraft der Bestandtheile der Moleküle, ja sogar des Aethers zu suchen sei. Für die fortschreitende Bewegung der Wasserstoffmoleküle bei 0° C. findet Clausius die Geschw. 1844m, woraus, da $\frac{1}{2}mv^2$ für alle Gase bei gleicher Temperatur denselben Werth besitzen muß, sich die molekulare Geschw. anderer Gase leicht berechnen läßt; für O ergibt sich 461m, für N 492m. Indessen legen die Moleküle nicht alle diese großen Wege in 1 Sec. zurück, sondern nach Clausius nur etwa 37%, weil die übrigen, in die Wirkungssphäre der Abstoßung anderer Moleküle gelangend, von diesen eine Verminderung ihrer Geschwindigkeit erfahren. In letzter Zeit hat man die mittleren Wege der Gasmoleküle zwischen je zwei Reflexionen und dadurch den Abstand der Moleküle von einander berechnet, und nach verschiedenen Methoden überraschend zusammenstimmende Resultate erhalten. Für H 222, O 114, Luft 108 Milliontel Millimeter, also für Luft im Mittel etwa 1/10000 Millimeter. Hieraus hat Loschmidt die Durchmesser der Moleküle berechnet und fand für H 4, für O 7, für N 8 Hundertmilliontel eines Centimeters.

2. Die Entstehung der Wärme oder die Wärmequellen.

389 **1. Wärme durch Arbeit** (Joule 1843—1850). Arbeit wird in Wärme verwandelt, wenn sie als Arbeit verschwindet; diese Verwandlung besteht darin, daß eine Körperbewegung in eine Molekularbewegung übergeht. Gewöhnlich geschieht dies dadurch, daß eine Körperbewegung durch einen anderen Körper plötzlich ganz oder theilweise gehemmt wird, weil dieser andere Körper sich entweder nicht als Ganzes bewegen kann, oder weil er selbst eine entgegengesetzte Bewegung hat, oder weil nicht genug Zeit vorhanden ist, um die Bewegung auf alle Körpertheile zu übertragen; es werden dann die getroffenen Theilchen voran gestoßen, durch den Widerstand des Körpers zurückgeworfen und dann wieder voran gestoßen, wodurch sie in Schwingungen gerathen. Die Verwandlung geschieht immer nach dem Gesetze der Aequivalenz, für jedes verschwundene Meterkilogramm Arbeit entsteht 1/424 = A°. Arbeit geht als solche verloren bei der Reibung, beim Stoße, beim Zusammendrücken, wie überhaupt durch jede Verminderung der Disgregation und durch gehemmte Bewegung.

Daß überhaupt durch Arbeit Wärme erzeugt wird, war schon seit den ältesten Zeiten bekannt (s. S. 8). Davy brachte (1812) zwei Eisstücke durch Reiben an einander zum Schmelzen. Mayer erwärmte (1842) Wasser durch Schütteln von 12 auf 13°. Interessant sind die Versuche Tyndalls, weil sie die Entstehung von Wärme schon durch geringe Arbeit und umgekehrt sichtbar machen (1862); er benutzte hierzu das feinste Thermometer, eine Thermosäule mit Thermomultiplicator. Er hielt ein kaltes Stück Holz an die Säule; die Nadel bewegte sich dann; aber sofort schlug sie die entgegengesetzte Richtung ein, wenn er das Stück Holz nur ein wenig reibend bewegte; dasselbe zeigte sich, wenn er mit einem Stücke Messing zuerst die Säule berührte und dann nach der Reibung desselben an einem Stücke kalten Holzes abermals, oder mit einem Rasirmesser vor und nach dem Schleifen, oder mit einem Stücke Tannenholz vor und nach einer starken Pressung, oder mit einer Bleikugel vor und nach einem Hammerschlag auf dieselbe, oder mit Quecksilber, bevor und nachdem es einigemale aus einem Glase in ein anderes gegossen worden war. Er brachte Wasser in einer auf die Schwungmaschine geschraubten kleinen Messingröhre zum Sieden, indem er die Röhre während der Drehung zwischen eine Eichenholzstange quetschte. Er blies mit einem Blasebalge Luft gegen die Säule, so daß sie an derselben sich rieb, und bemerkte Erwärmung; ließ er dagegen zusammengepreßte Luft frei in den Luftraum strömen, so bemerkte er Abkühlung, weil hier die Luft eine Arbeit vollbringt, nämlich den Druck der äußeren Luft überwindet; dasselbe zeigt sich vor und nach dem Oeffnen eines Siphons. Hier tritt also eine Verwandlung von Wärme in Arbeit zu Tage. Würde man dagegen die Thermosäule in ein luftleeres Gefäß setzen, in welches man Luft aus einem anderen Gefäße einströmen ließe, so würde keine Bewegung der Nadel wahrgenommen werden, weil jetzt weder Arbeit verzehrt noch geleistet wird. Diese drei Versuche sind besonders lehrreich und verdienen eine eingehende Betrachtung.

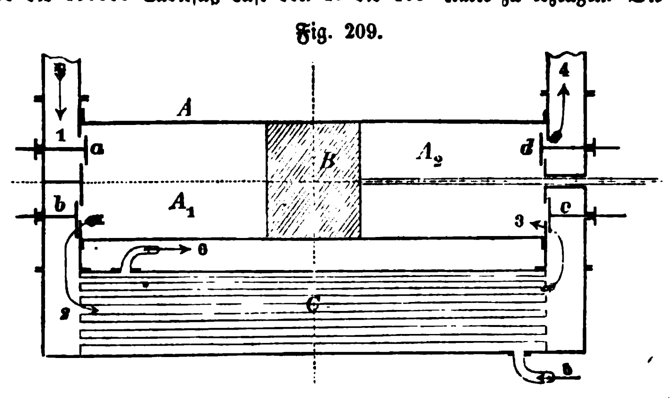
Eine Geschützkugel erwärmt sich auf ihrem Wege durch die Luft theilweise durch die Reibung, hauptsächlich aber durch die Wärme, welche durch Zusammenpressung der Luft entsteht; auf dieselbe Weise entsteht die Wärme, welche die Sternschnuppen und Feuerkugeln

glühend und daher sichtbar macht. Daß durch Zusammenpressen von Luft Wärme entsteht, beweist besonders deutlich das pneumatische Feuerzeug; dasselbe besteht aus einem starken Glascylinder, in den ein Kolben mit einem Handgriffe luftdicht paßt; stößt man den Kolben rasch nieder, so entsteht so viel Hitze, daß sich ein Stückchen Zunder oder Schießwolle entzündet, das man an die Unterseite des Kolbens befestigt hatte. Die von Shaw (1870) erbaute amerikanische Pulverramme ist eine directe Anwendung des pneumatischen Feuerzeuges und eine interessante Ueberführung der mechanischen Wärmetheorie in das practische Leben. Auf den einzurammenden Pfahl wird ein Mörser befestigt, über welchem senkrecht in einiger Höhe ein eiserner Rammbär schwebt, von der Form eines riesigen Eisenstöpsels, der in den Mörser eben paßt. In den Mörser wird Pulver gebracht, und nach seiner Auslösung fällt der Rammbär in den Mörser, verdichtet die Luft und erzeugt soviel Wärme, daß sich das Pulver entzündet. Die lebendige Kraft der Explosionsgase schleudert den Rammbär wieder in die Höhe, treibt aber auch gleichzeitig den Pfahl mit größerer Kraft in den Boden, als es der fallende Klotz vermöchte. Nach sofortiger Einschüttung von neuem Pulver fällt der Bär wieder herab, bewirkt wieder eine Explosion und fliegt wieder hinauf u. s. w.; das Einrammen geschieht in überraschend kurzer Zeit. Hier verwandelt sich die lebendige Kraft des fallenden Bärs in Wärme, diese entfesselt die Spannkraft des Schießpulvers, welche in Gestalt von Luftspannung d. i. durch die lebendige Kraft der Luftmoleküle die Arbeit des Einrammens und des Hebens des Rammbärs vollbringt.

Umgekehrt entsteht Abkühlung, wenn sich ausdehnende Luft bei ihrer Ausdehnung Arbeit leistet. Dies zeigt der vorhin angeführte Tyndall'sche Versuch; jedoch tritt diese Erscheinung schon bei dem Auspumpen von Luft auf, weil die ausströmende Luft durch Ueberwindung des Luftdruckes Arbeit producirt und daher Wärme consumirt. Am auffallendsten ist dies wieder mittels einer Thermosäule wahrnehmbar, die man gegen die Wand eines Metallgefäßes lehnt, aus dem man die Luft pumpt; die Nadel geht beim Auspumpen stark zurück und beim Einströmen wieder voran. Eine Luftpumpenglocke trübt sich während des Auspumpens, weil sich durch die Abkühlung der Wasserdampf in derselben condensirt und daher eine Dunstwolke bildet, die indeß beim Einströmen wieder verschwindet durch die Wärme, welche die Arbeit des äußeren Luftdruckes dann erzeugt. Läßt man bei dem Wassertrommelgebläse die Luft erst nach stärkerer Verdichtung ausströmen, so fällt der Wasserdunst als Schnee zu Boden, und die Röhre bedeckt sich mit Eiszapfen.

Eine höchst interessante Anwendung dieser Folgerung aus der mechanischen Wärmetheorie ist Windhausens Kälte-Erzeugungs-Maschine (1872), welche mannichfache vortheilhafte Verwendbarkeit besitzt, so zur Production von wasserklarem Eis, während das durch Chemikalien erzeugte Eis undurchsichtig ist, in Bierbrauereien zur Kühlung der Würze, zur Kühlung und Ventilation von Kellern, Schlachthäusern, Theatern, Concerthallen, Hospitälern, zur Conservirung von Fleisch und Cerealien, in Paraffin- und Oelfabriken, sowie zu zahlreichen chemischen Zwecken; denn diese Maschine ist im Stande, bei Anwendung einer Dampfmaschine oder eines anderen Motors von 6 bis 20 Pferden stündlich 15000 bis 150000 Cubikfuß Luft von 40 bis 100° Kälte zu erzeugen. Die Fig. 209,

Fig. 209.



eine Skizze der Haupttheile, kann eine Idee von der Wirkungsweise der Maschine geben. Der Kolben B wird in dem Cylinder A durch die Dampfmaschine nach rechts und durch diese und die comprimirte Luft nach links geschoben. Bei der Bewegung nach rechts öffnet sich das Saugventil a, und es strömt Luft von atmosphärischer Spannung in den Cylinder-

raum A_1. Ist der Cylinder ganz erfüllt, so geht der Kolben nach links, die Luft wird bis zu etwa 2^{at} comprimirt, schließt das Saugventil a, öffnet das Druckventil b und strömt in der Pfeilrichtung 2 in den Kühler C. Durch ihre Compression ist sie nämlich stark erhitzt worden und muß daher einer Abkühlung unterworfen werden, welche durch das bei 5 ein- und bei 6 ausströmende Wasser vollbracht wird. Die so abgekühlte und comprimirte Luft gelangt durch das von einer Steuerung geöffnete Ventil c in den Cylinderraum A_2 und verrichtet hier gemeinschaftlich mit der Dampfmaschine die Arbeit der Linksbewegung des Kolbens und der Compression in A_1; da das Ventil c bei einer gewissen Kolbenstellung geschlossen wird, so dehnt sie sich hierbei aus und kühlt sich bis tief unter den Eispunkt ab. Bei der folgenden Rechtsbewegung des Kolbens fließt die kalte Luft durch das Auslaßventil d an ihren Bestimmungsort. Strömt dieselbe z. B. in den feuchte Luft enthaltenden Maschinenraum, so füllt sich derselbe bald mit Schneeflocken. Man glaubt, mittels dieser Maschine selbst im Sommer eine Schlittschuhbahn herstellen zu können.

Merkwürdig ist die Wärmebildung durch Reibung im magnetischen Felde; hängt man zwischen den beiden Polen eines kräftigen Hufeisen-Elektromagnetes eine Silbermünze an einem Faden auf, so verliert dieselbe bei geschlossenem Strome ihre freie Beweglichkeit und wird warm, wenn man sie mit Gewalt dreht; versetzt man eine Metallröhre, die ein leicht schmelzbares Metall als Kern enthält, an dieser Stelle in rasche Rotation, so schmilzt das Metall; Foucault brachte mittels Kurbel und Räderwerk eine Kupferscheibe zwischen den beiden Polen in rasche Drehung und beobachtete dann eine starke Erhitzung der Scheibe. — Fällt eine Bleikugel auf eine Eisenplatte, so erfahren beide eine Temperaturerhöhung, die man an der Thermosäule messen kann; durch Fallenlassen aus verschiedenen Höhen kann man zeigen, daß die erzeugte Wärme im einfachen Verhältnisse zur Höhe, also im quadratischen zur Geschwindigkeit steht, ein Hinweis auf die theoretische Definition der Wärmemenge. Aus der Fallhöhe und dem Gewichte läßt sich durch das thermische Aequivalent A von 1^{mk} die entstandene Wärmemenge berechnen; in ähnlicher Weise kann man auffinden, welche Wärmemenge entstände, wenn ein Planet, z. B. die Erde, gegen einen anderen Weltkörper stoßen oder in seinem Laufe plötzlich gehemmt würde; so hat Mayer gefunden, daß durch plötzlichen Stillstand der Erde eine zur Verdampfung derselben ausreichende Hitze erzeugt würde, und durch Zusammenstoß mit der Sonne eine solche Hitze, wie durch Verbrennung von 5600 Erdkugeln aus festem Kohlenstoff. — Wie bei Verminderung der Disgregation durch Stoß und Druck Wärme entsteht, so entsteht auch durch jede andere Verminderung der Disgregation d. i. durch größere Annäherung getrennter Theilchen Wärme und umgekehrt durch Vermehrung der Disgregation Kälte; hierher gehören die chemischen Verbindungen, bei denen bekanntlich vorher getrennte Theilchen in enge Berührung kommen, dann die Verwandlung luftförmiger Körper in flüssige oder feste oder von flüssigen in feste, Erscheinungen, die später speciell betrachtet werden. — Zur Wärme durch Arbeit gehört auch die Wärme des elektrischen Funkens und des elektrischen Stromes, da die Elektricität durch Ueberwindung des Leitungswiderstandes geschwächt und die verschwundene Kraft in Wärme umgesetzt wird.

390 **2. Die Sonnenwärme** (Pouillet 1838, Helmholtz 1844). Die Hauptwärmequelle für die Erde ist die Sonne. Nach Pouillets Messungen mit seinem Pyrheliometer erhält 1^{qcm} der Erdoberfläche jährlich von der Sonne eine Wärmemenge von $1/4$ Million Cal., woraus sich die jährliche Strahlung der Sonne überhaupt gleich 3000 Quintillionen Cal. ergibt, eine Wärmemenge, welche ausreichend wäre, einen 36^m dicken Eishimmel um die Sonne herum, dessen Radius gleich der Erdweite sein könnte, zu schmelzen. Wie diese außerordentliche Wärmemenge entstanden ist und sich erhält, darüber gibt es verschiedene Erklärungen, welche wahrscheinlich alle zutreffend sind. Nach Mayer wird die Sonnenwärme durch den Einsturz zahlreicher Meteoriten erhalten, nach Helmholtz ist sie durch die allmälige Zusammenziehung der Sonnenmaterie aus einer Nebelmasse entstanden und erhält sich durch die fortdauernde Zusammenziehung; eine plötzliche Verdichtung des Urnebels auf das jetzige Volumen würde eine Temperatur von 28 Mill. Grad hervorbringen, und eine Zusammenziehung um $1/10000$ würde ausreichen, um den nöthigen Sonnenwärmevorrath für 2000 Jahre zu erzeugen. Die Annahme, daß die Sonne eine Gluth habe und durch diese Gluth dauernd erwärme, reicht nicht aus, weil durch ihre Ausstrahlung die Sonne in 5000 Jahren sich um 3000^0 abkühlen müßte, selbst wenn sie aus lauter Wasserstoff bestände, der bekanntlich am meisten Wärme bei der Abkühlung ausstrahlt.

Das Pyrheliometer von Pouillet bestand aus einem silbernen, dosenförmigen Gefäße von 1 dm Durchmesser und 15 mm Höhe, das mit Wasser gefüllt und mit seiner vorderen, berußten Fläche der Sonne zugewendet wurde; die hintere Fläche wurde mit einem Stöpsel geschlossen, durch welchen eine Thermometerröhre ging, deren Kugel sich in dem Wasser befand. Das Thermometer bildete die Achse des Apparates, um die man denselben während der Bestrahlung drehte, damit die Erwärmung des Wassers gleichmäßig geschah. Die Aufstellung war eine solche, daß die Sonnenstrahlen senkrecht auf die berußte Fläche fielen; dies war der Fall, wenn der Schatten des Gefäßes auf eine Scheibe von demselben Durchmesser fiel, die weit hinten genau parallel zur berußten Fläche auf der Drehachse festsaß. Aus dem Steigen des Thermometers nach einer gewissen Zeit konnte man die dem Wasser mitgetheilte Wärmemenge berechnen. Dieselbe bedurfte einer Correctur, weil der Ruß nicht absolut frei von Reflexion ist, und weil die Luft einen Theil der Sonnenwärme absorbirt.

391 **3. Wärme durch Verbrennung** (Lavoisier 1781, Tyndall 1863). Die bedeutendste irdische Wärmequelle ist die Verbrennung, d. i. die chemische Vereinigung mit Sauerstoff. Bei jeder chemischen Verbindung findet offenbar eine Annäherung vorher getrennter Atome oder Moleküle statt, es tritt eine Verminderung der Disgregation und daher eine Wärmeerzeugung ein: die chemische Vereinigung ist in der Regel mit Entstehung von Wärme begleitet. Dieser Vorgang ist offenbar eine Verwandlung von Spannkraft oder consumirter Arbeit in die lebendige Kraft der Wärme; denn denkt man sich die noch getrennten Körper wirklich verbunden, so müßte, um sie wieder in den getrennten Zustand zurück zu führen, um also die sich einander anziehenden Atome und Moleküle aus einander zu bringen, auf dem ganzen Trennungswege die Anziehung derselben gegen einander überwunden, d. i. eine Arbeit geleistet werden. Diese bei der Zersetzung nöthige Arbeit ist in Form von Spannkraft, die wir chemische Verwandtschaft nennen, in den getrennten Körpern vorhanden; dieselbe verwandelt sich, wie jede Spannkraft, wenn das Hinderniß ihrer Wirksamkeit beseitigt ist, in lebendige Kraft, hier in die lebendige Kraft der Wärme. Das Hinderniß der Spannkraft, welches z. B. in einem gehobenen Gewichte in der Unterstützung desselben liegt, ist bei der chemischen Vereinigung der Zusammenhang jedes Bestandtheiles in sich; damit die Atome oder Moleküle ihrer Spannkraft folgen können, müssen sie in jedem Bestandtheile in freien Zustand versetzt und in die Nähe der Atome oder Moleküle des anderen gebracht, die Bestandtheile müssen zerkleinert, gemengt und meist, um die Atome und Moleküle frei zu machen, erhitzt werden. Ist dies geschehen, so kann die Spannkraft zur Wirkung kommen, die Atome oder Moleküle zusammentreiben und sich so in lebendige Kraft derselben, d. i. in Wärme verwandeln. Wäre die Spannkraft bekannt, die in den sich verbindenden Körpern vor der Verbindung vorhanden ist, und könnte man die Spannkraft bestimmen, die nach der Verbindung in dem zusammengesetzten Körper noch enthalten ist, so müßte die Spannkraftsdifferenz, in Wärmemaß ausgedrückt, also mit $1/424^c$ multiplicirt, die entstehende Wärme angeben. Nun hängt aber diese Spannkraftsdifferenz ab von der Stärke der Anziehung und Entfernung der Atome innerhalb der Moleküle vor und nach der Verbindung, von der Anziehung und Entfernung der Moleküle von einander vor und nach der Verbindung, von der Verdichtung oder Verdünnung, die bei der Verbindung stattfindet, von dem Aggregatzustande vor und nach der Verbindung, von innerer und äußerer Arbeit, die während der Vereinigung producirt oder consumirt wird, also von vielen der Berechnung unzugänglichen Umständen. Hieraus folgt die Unmöglichkeit, die auftretende Wärme theoretisch zu berechnen; man hat daher die Verbrennungs-, Verbindungs-, Lösungs-, Zersetzungs- u. a. Wärme durch Versuche bestimmt; so entsteht nach Favre und Silbermann bei der Verbrennung von 1 kg Wasserstoff der Wärmebetrag von 34462 c, von 1 kg Kohlenstoff 8000 c, zwei besonders wichtige Beträge, da alle gewöhnlichen Brennmaterialien aus jenen zwei Elementen bestehen.

Die Existenz der Spannkraft in den verbindungsfähigen Körpern ist theils durch die chemische Verwandtschaft, theils durch den Arbeitsverbrauch bei der Zersetzung bewiesen. Um die sich anziehenden Moleküle oder Atome von einander zu trennen, um also die Arbeit der Zersetzung zu leisten, muß eine lebendige Kraft zugeführt werden, und zwar, da es sich um eine Wirkung auf kleinste Theilchen handelt, eine lebendige Kraft, die in Bewegung kleinster Theilchen besteht, also Wärme; durch Zersetzung wird also Wärme oder Arbeit verbraucht. So ist zur Zersetzung von 9kg Wasser eine Wärme von 34 462c oder eine Arbeit von 34 462 . 424 = ca 15 Millionen mk nöthig; folglich sind in 1kg H gegen 8kg O ca 15 Mill. mk Spannkraft vorhanden. Wie sich diese Spannkraft nun bei der Verbindung in die lebendige Kraft der Wärme verwandelt, kann nicht allgemein angegeben werden, da die Vorgänge sehr verschieden und verwickelt sind. Bestände die chemische Verbindung nur in einem Zusammentreten vorher isolirter Atome, so wäre die Erklärung wohl einfach folgende: die einander anziehenden Atome stürzen bei abnehmender Entfernung mit zunehmender Geschwindigkeit gegen einander, treffen sich endlich, prallen aus einander, werden aber von neu zuströmenden Atomen wieder zusammen gestoßen und gerathen auf diese Weise in Schwingungen, d. i. in höhere Temperatur, oder sie fliegen als Gasmoleküle vereinigt in geradliniger Bewegung aus der zusammenwirkenden Stoffmasse mit vermehrter Geschwindigkeit, d. i. mit erhöhter Temperatur, hinaus. So einfach ist jedoch der Vorgang der chemischen Verbindung nicht, da selbst die Elemente nicht aus isolirten Atomen, sondern aus Molekülen bestehen; bei der Verbrennung des Kohlenstoffs mögen z. B. die Sauerstoffmoleküle auf ein Stück Kohle losstürzen, dort ein durch die Entzündungstemperatur frei gemachtes Kohlenstoffatom zu CO^2 aufnehmen und als Kohlendioxydmolekül abprallen; dabei mag ein Theil ihrer lebendigen Kraft auf dem Kohlenstück zurückbleiben, dessen Gluth erhöhen und so die Entzündungstemperatur zur weiteren Verbrennung erzeugen. Da hier durch die erzeugte Wärme die weitere Verbrennung ermöglicht wird, wie in allen ähnlichen Fällen, so ist leicht ersichtlich, daß auch hier nach Beseitigung des Hindernisses (wie nach der Wegnahme der Unterstützung eines gehobenen Gewichtes) die Spannkraft sich unaufhaltsam von selbst in lebendige Kraft verwandelt, während die umgekehrte Verwandlung, also die chemische Zersetzung, wie in allen Fällen nicht von selbst, sondern nur bei Uebergang von Wärme zu einem kälteren Körper geschieht. Wie weit in diesem Falle die Disgregationsverminderung geht, ist dem Kohlenstoff gegenüber nicht, dem Sauerstoff gegenüber leicht ersichtlich, da das Kohlendioxyd leicht coërcibel, der Sauerstoff permanent ist. Bei der Verbrennung von Wasserstoff muß jedenfalls das Sauerstoffmolekül gespalten, also innere Arbeit geleistet, producirt werden, wodurch offenbar ein gewisser Wärmebetrag verzehrt wird. Trotz dieses Wärmeverbrauchs entsteht hier die bedeutende Wärme von 34 000c; zur Erklärung derselben reicht nicht die Verdichtung der 3 Volumina Knallgas auf 2 Vol. Wasserdampf und die noch weiter gehende Verdichtung zu Wasser aus; es muß noch vorausgesetzt werden, was auch aus der Beständigkeit des Moleküls H^2O und der zu seiner Zersetzung nöthigen großen Arbeit folgt, daß H^2 und O sich sehr stark anziehen, mit großer Kraft auf einander stürzen und daher eine große Geschwindigkeit bewirken. Wo diese Ursache nicht mitwirkt, kann jene innere Arbeit zur Spaltung der Sauerstoffmoleküle sogar die Wärme überwiegen, welche die nachher erfolgende schwächliche Vereinigung erzeugt; dies ist der Fall bei der Entstehung von Stickstoffoxyd; der Stickstoff hält den Sauerstoff mit geringerer Kraft fest als die Sauerstoffatome innerhalb des Sauerstoffmoleküls einander anziehen; die für die Spaltung des Sauerstoffmoleküls verzehrte Wärme überwiegt weit die durch Vereinigung mit dem Stickstoff entstehende Wärme, so daß trotz der Verdichtung bei der Bildung des Stickoxyds Wärme verzehrt wird; einfach erklären sich hieraus die beobachteten Thatsachen, daß bei der Zersetzung von Stickoxyd Wärme entsteht, und daß bei der Verbrennung von Kohle in Stickoxyd mehr Wärme erzeugt wird als bei der Verbrennung in Sauerstoff. Aehnlich verhalten sich Cyan, Wasserstoffsuperoxyd und Jodwasserstoff.

Die Verbrennungswärme von H und C, sowie von anderen Stoffen, wurde schon von dem Vater der Verbrennungslehre, Lavoisier, aber nicht genau aufgefunden; derselbe benutzte ein mit Eis umgebenes Calorimeter und bestimmte die erzeugte Wärmemenge aus der Menge des geschmolzenen Eises; Dulong benutzte ein Wassercalorimeter. Von Favre und Silbermann wurden die Verbrennungen in einem Gefäße von vergoldetem Kupferblech vorgenommen, in welches drei Röhren gingen, eine für die Zuführung des Sauerstoffs, eine für die Ableitung der gasförmigen Verbrennungsproducte und eine weitere mit Glasdeckel und Spiegel zur Beobachtung von außen. Dieses Gefäß stand in dem mit Thermometern versehenen Wassercalorimeter von Silberblech, dieses in einem mit Schwanenpelz gefüllten Gefäße, der auch den Deckel füllte, und dieses abermals in einem Wassergefäße, um äußere Wärme von dem Calorimeter abzuhalten. Nach solchen und ähnlichen genauen Methoden wurden nicht blos die Verbrennungswärmen der brennbaren Stoffe, sondern

auch die Vereinigungswärmen der Elemente und von zahlreichen chemischen Vereinigungen aufgesucht; so ergab sich z. B. die Entstehung großer Wärmemengen bei den Salzbildungen durch Säuren und Basen. In letzter Zeit werden die Wärmeverhältnisse bei den chemischen Processen und Lösungen vielseitig untersucht, weil man hierdurch der Energie der Stoffe näher zu kommen hofft.

Aus der oben vorgetragenen Verbrennungstheorie ergeben sich Sätze, die durch die Versuche bestätigt werden: Die Vereinigungswärme ist um so größer, je stärker sich die Bestandtheile anziehen, je stabiler also die Verbindung ist: so entstehen bei der Salzbildung durch Säuren und Basen, bei den Verbrennungen leichter und unedler Metalle große Wärmemengen, während edle Metalle nur wenig Wärme liefern. Bei der Zersetzung unbeständiger (complicirter, organischer) Stoffe in beständigere, einfachere, z. B. von Zucker in Weingeist und Kohlendioxyd entsteht Wärme. Allotropische Modificationen von Elementen und isomere Verbindungen ergeben verschiedene Wärmemengen. Die Verbrennungswärme eines Stoffes bleibt dieselbe, wenn der Stoff mit Zwischenstufen zum Schlußproduct verbrennt, als wenn er sofort zum Schlußproduct verbrennt; Kohle erzeugt ebenso viel Wärme, wenn sie erst zu Kohlenoxyd und dieses zu Kohlendioxyd verbrennt, als wenn sie direct in Kohlendioxyd übergeht. Dagegen sind Sätze, die aus älteren ungenaueren Versuchen folgten, aber der Theorie nicht entsprachen, durch genauere Versuche gefallen; so der Welter'sche Satz: Der Verbrauch gleicher Sauerstoffmengen bei verschiedenen Verbrennungen erzeugt gleiche Wärmemengen; der Dulong'sche Satz: die Verbrennungswärme einer Verbindung ist gleich der Summe der Verbrennungswärmen der Bestandtheile.

Aus der Verbrennungswärme und der specifischen Wärme des Verbrennungsproductes läßt sich die Temperatur einer Verbrennung, einer Flamme berechnen. So entsteht nach Favre und Silbermann durch Verbrennung von 1^{kg} H, d. i. durch Vereinigung mit 8^{kg} O zu 9^{kg} Wasserdampf, eine Wärme von 34462^{c}; 1^{kg} Wasserdampf entwickelt daher 3829^{c}. Da nun die specifische Wärme des Wasserdampfes, was später erhellen wird, $= 0,475$ ist, da also $0,475^{c}$ im Stande sind 1^{kg} Wasserdampf um 1^{0} zu erwärmen, so ertheilen die 3829^{c} dem Wasserdampf eine Temperatur von $3829 : 0,475 = 8000^{0}$. Obwohl man immer an der Höhe dieser berechneten Temperatur der Knallgasflamme zweifelte, so brachte doch erst Devilles Entdeckung der Dissociation (1863) vollständige Sicherheit; hiernach wird Wasser bei einer Temperatur von 3000^{0} vollständig zersetzt; folglich können sich seine Bestandtheile bei dieser oder einer höheren Temperatur unmöglich mit einander verbinden; sie können es auch bei einer etwas niedrigeren Temperatur nicht vollständig, weil Wasserdampf bei dieser Temperatur im Zustande partieller Zersetzung, im Zustande der Dissociation ist. Bunsen zeigte nun auch durch neue Versuche (1867) und darauf gestützte Rechnungen, daß reines Knallgas in der That schon bei 2844^{0}, Knallgas mit atmosphärischer Luft gebildet bei 2024^{0} verbrenne, reines Kohlenoxydknallgas bei 3033^{0}, mit Luft 1997^{0}, daß aber bei dieser Verbrennung nur $^{1}/_{3}$ des Gases wirklich verbrenne, die übrigen $^{2}/_{3}$ aber durch die hohen Temperaturen die Vereinigungsfähigkeit verloren haben; so bestehen z. B. die Verbrennungsproducte von reinem Knallgas aus 1 Vol. O, 2 Vol. H und 1 Vol. Wasserdampf.

4. Die Lebenswärme. In allen Organen des menschlichen und des thierischen Körpers, mit Ausnahme der Horngebilde, finden fortwährend Oxydationsprocesse statt, d. i. Disgregationsverminderungen, durch welche bekanntlich Wärme oder Arbeit entsteht; der nöthige Sauerstoff gelangt durch die Lungen in das Blut und so in alle Körpertheile, die oxydirbaren Stoffe, hauptsächlich Kohlenwasserstoffe gelangen durch die Verdauung in das Blut und so ebenfalls an alle Körpertheile, während die Oxydationsproducte, Kohlendioxyd und Wasserdampf durch Haut, Lunge u. s. w. entfernt werden. Die Oxydationen im Muskel erzeugen Bewegungen der Moleküle, die sich in Contraction der Muskelfaser verwandeln; alle übrigen Oxydationen erzeugen direct Wärme. Im ruhenden Körper werden sämmtliche Leistungen, selbst die unwillkürlichen Bewegungen in Wärme verwandelt; im arbeitenden Körper überträgt sich die lebhaftere Oxydation der arbeitenden Theile auch auf die übrigen; 392

außerdem wird ein großer Theil der Muskelarbeit in Wärme verwandelt, durch Reibung des Muskels in seinen Hüllen, der Sehnen in ihren Scheiden, der Knochen in ihren Gelenkpfannen; daher ist die vom arbeitenden Körper producirte Wärmemenge größer als die des ruhenden. Das Blut vertheilt die Wärme gleichmäßig durch den Körper, der hierdurch im normalen Zustande eine Temperatur von 37,5° hat; dieselbe Temperatur hat auch der Körper der Säugethiere, eine etwas höhere besitzen die Vögel. Beim Menschen steigert sie sich in Fieberzuständen bis auf 42—44° und sinkt in Cholerafällen oder in der Todesnähe tiefstens bis auf 35°; bei 42° soll schon das Blut gerinnen, bei 49° tritt Wärmestarre der Muskeln ein. Nach dem Tode hat die allgemeine Muskelzusammenziehung der Todesstarre eine vorübergehende Temperatur-Erhöhung zur Folge.

Früher schied man (nach Liebig) den Vorgang der Krafterzeugung von dem der Wärmebildung; die letztere hielt man für Folge der Oxydation der Kohlenwasserstoffe des Fettes, die erstere für eine Folge von chemischen Thätigkeiten der stickstoffhaltigen Muskelsubstanz. Seitdem aber gefunden wurde, daß durch Thätigkeit keine vermehrte Ausscheidung von Harnstoff, des chemischen Productes der stickstoffhaltigen Körpersubstanzen, entsteht (Voit), daß aber der thätige Muskel, ausgeschnitten, künstlich von Blut durchströmt, wie auch im Organismus, mehr Kohlendioxyd entwickelt als der ruhende (Ludwig), daß der ganze Organismus zur Zeit der Arbeit mehr Kohlendioxyd ausscheidet als während der Ruhe (Regnault und Reiset), daß der Muskel im Organismus wie auch ausgeschnitten im Zustande der Thätigkeit mehr Sauerstoff verzehrt als im Ruhezustande, wie aus dem sauerstoffärmer abfließenden Venenblute ersichtlich ist (Ludwig), sowie daß endlich der ganze Organismus bei der Arbeit mehr Sauerstoff als in der Ruhe verbraucht, — seitdem schreibt man die Kraftbildung ebenfalls der Oxydation der Kohlenwasserstoffe zu. Hiermit fällt auch Liebigs Scheidung der Nahrungsmittel in Respirations- und plastische Mittel und gewinnen die stickstofffreien Nahrungsmittel (Bier, Reis, Kartoffeln) ihren im Leben immer behaupteten Werth auch in der Wissenschaft wieder.

Es ist leicht ersichtlich, daß auch die 3 letzten Wärmequellen ihren Grund in Verwandlung von Arbeit in Wärme haben. Umgekehrt wird sich zeigen, daß die meisten Wirkungen der Wärme Verwandlungen der Wärme in Arbeit sind. Durch vermehrte Wärmezufuhr wird nämlich die lebendige Kraft der Moleküle und ihrer Bestandtheile vergrößert, demgemäß werden die Moleküle und ihre Atome weiter von einander entfernt, die Hauptwirkung der Wärme ist Vergrößerung der Disgregation. Hierdurch wird das Volumen der Körper vergrößert: die Ausdehnung; feste Körper werden in flüssige, flüssige in luftförmige verwandelt: Schmelzung und Verdampfung; die Bestandtheile der Moleküle werden von einander getrennt: chemische Zersetzung. Die meisten Wärme-Erscheinungen sind also Verwandlungen von Wärme in Arbeit und Verwandlungen von Arbeit in Wärme. Der Satz von der Aequivalenz von Wärme und Arbeit ist daher ein Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.

393 **Die zwei Hauptsätze der mechanischen Wärmetheorie** (Mayer 1843, Clausius 1850—1865). 1. Die Aequivalenz von Wärme und Arbeit: Wenn Arbeit als solche verschwindet, so entsteht Wärme, und zwar für 1^{mk} $^1/_{424}{}^c$; wenn Wärme in Arbeit verwandelt wird, so entstehen für 1^c 424^{mk}. Drückt man die Arbeit ebenfalls nach Wärmemaß aus, indem man sie mit $A = {}^1/_{424}{}^c$ multiplicirt, so nennt man das Product Werk. Weil bei der Entstehung von Wärme Werk verbraucht wird, und weil Entstehung und Verbrauch entgegengesetzt sind, so muß man den Verbrauch von Werk als negativ auffassen, wenn man die Entstehung von Wärme als positiv bezeichnen will; und da nach dem 1. Hauptsatze bei einem und demselben Processe das verbrauchte Werk der entstandenen Wärme gleich ist, so kann man diesen Satz auch so aussprechen: die algebraische Summe von Wärme und Werk ist in jedem Processe gleich Null.

Wir haben den ersten Hauptsatz (s. 387. 3.) der Vollständigkeit wegen hier noch einmal angeführt; derselbe folgt einfach aus dem Princip von der Erhaltung der Kraft oder besser gesagt der Energie, dessen allgemeine Form nach Clausius „die Energie des Weltalls ist constant" ebenfalls schon früher angegeben wurde (35.). Experimentell nachgewiesen ist der erste Hauptsatz durch die zahlreichen Versuche von Mayer, Joule, Hirn u. A. — Mathematisch ausgedrückt ist derselbe durch die Gleichung $Q = U + A \cdot W$, worin Q die einem

Körper zugeführte Wärmenge, U die Zunahme der Energie in Wärmemaß ausgedrückt und W die äußere Arbeit derselben bedeutet.

2. **Die Aequivalenz der Verwandlungen:** Die algebraische Summe der Verwandlungen ist bei umkehrbaren Processen gleich Null, bei nicht umkehrbaren positiv. — Außer den Verwandlungen von Werk in Wärme und von Wärme in Werk, kann man, wenn unter Werk hier vorwiegend der Wärmewerth äußerer Arbeit verstanden wird, noch folgende Verwandlungen anführen, die als Wärmewirkungen zu bezeichnen sind: Disgregationsvermehrung und Disgregationsverminderung, Erhöhung der Temperatur oder Verwandlung von niederer Wärme in höhere und Erniedrigung der Temperatur oder Verwandlung von höherer Wärme in niedere, Uebergang von Wärme aus einem wärmeren in einen kälteren Körper und umgekehrt, Uebergang von Wärme aus einem kälteren in einen wärmeren Körper. Bezeichnen wir immer die erste der zwei entgegengesetzten Verwandlungen als positiv, so müssen wir die zweite als negativ auffassen. Umkehrbare Processe sind solche, bei denen alle Verwandlungen in der Weise stattfinden, daß die umgekehrten Verwandlungen unter denselben Umständen geschehen.

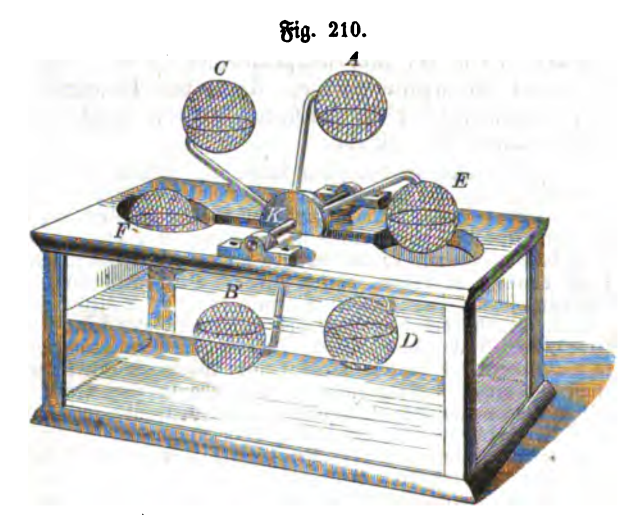
Der Beweis des Satzes kann hier blos an Beispielen stattfinden. Nehmen wir den einfachsten Fall, daß ein vollkommenes Gas sich ausdehnt, so sind damit 2 Verwandlungen vollbracht, Vermehrung der Disgregation (pos.), Verwandlung von Wärme in Werk (neg.). Diese beiden Verwandlungen sind einander gleich und entgegengesetzt, ihre algebraische Summe ist daher = Null; es handelt sich nur darum, Werthe für diese Verwandlungen aufzufinden. Für die in Werk verwandelte Wärme dürfen wir als Verwandlungswerth nicht gerade die Menge der Wärme setzen; denn das Werk besteht hier nur in Ueberwindung des äußeren Druckes, da bei der Ausdehnung eines vollkommenen Gases keine Anziehung zu überwinden ist (387. 4). Findet aber dieselbe Disgregationsvermehrung bei höherer Temperatur statt, so muß wegen des höheren Druckes mehr Wärme in Werk verwandelt werden. Es entspricht also derselben Disgregationsvermehrung in zwei verschiedenen Fällen eine verschiedene in Werk verwandelte Wärmemenge; der Verwandlungswerth dieser zwei Wärmemengen muß jedoch derselbe sein, da er dem Verwandlungswerthe einer und derselben Disgregationsvermehrung äquivalent ist. Bei höherer Temperatur ist der Druck deßhalb größer, weil die lebendige Kraft der einzelnen Gastheilchen, d. i. die absolute Temperatur größer ist; um bei dieser höheren Temperatur die Disgregation um gleichviel zu vermehren, muß offenbar eine Wärmemenge, eine lebendige Kraft zugeführt werden, die zu der lebendigen Kraft der einzelnen Theilchen in demselben Verhältnisse steht wie bei der niederen; es ist daher der Aequivalenzwerth der in Werk verwandelten Wärmemenge gleich dieser Wärme dividirt durch die absolute Temperatur $= Q : T$. Drücken wir auch die an Zeichen entgegengesetzte Disgregationsvermehrung in gleicher Weise aus, so ist die Summe dieser beiden gleichen Aequivalenzwerthe der Verwandlungen = Null. Der mathematische Ausdruck des zweiten Satzes für umkehrbare Processe ist daher $\Sigma(Q : T) = 0$. Dasselbe würde sich für jeden Proceß ergeben, der aus mehr als 2 umkehrbaren Veränderungen besteht.

Uebrigens sind sehr viele Processe nicht umkehrbar. Ein vollkommenes Gas kann sich ausdehnen (387. 4), ohne Arbeit zu vollbringen, kann sich aber nicht wieder zusammenziehen, ohne daß es Arbeit verbraucht. Es geschieht also hier eine Disgregationsvermehrung (pos.) ohne eine gleich große entgegengesetzte, compensirende Verwandlung, die Disgregationsverminderung (neg.) geschieht dagegen nur durch eine äquivalente Verwandlung von Arbeit in Wärme (pos.). — Ebenso geschieht z. B. bei der Reibung die Verwandlung von Arbeit in Wärme (pos.), ohne daß eine gleiche compensirende andere Verwandlung mit einhergeht, während eine Verwandlung von Wärme in Arbeit (neg.) z. B. in der Dampfmaschine nicht stattfindet, ohne daß dabei eine äquivalente positive Verwandlung geschieht, ein Uebergang von Wärme aus dem Dampfkessel in den Condensator oder in die Luft. — Wärme kann aus einem wärmeren Körper ohne Weiteres durch Leitung oder Strahlung in einen kälteren übergehen (pos.), während der negative Uebergang aus einem kälteren Körper in einen wärmeren nur möglich ist, wenn in jenem zuerst Wärme aus Werk entsteht (pos.) und diese dann übergeführt wird. Die Verwandlung der Spannkraft der chemisch sich verbindenden Stoffe in die lebendige Kraft der Wärme geschieht (nach 391.) von selbst, die umgekehrte Verwandlung aber nur bei einem gleichzeitigen Wärmeübergang. So finden wir, daß die negativen Verwandlungen immer durch äquivalente positive compensirt werden, die positiven aber nicht, woraus sich ergibt, daß die Summe der Verwandlungen in einem nicht umkehrbaren Processe positiv ist.

Wird der zweite Grundsatz auf das Weltall angewendet, so ergibt sich, daß die Summe der positiven Verwandlungen immer größer wird und ein Maximum erreichen muß, nach welchem keine Verwandlungen mehr möglich sind; Clausius nennt die Summe aller Verwandlungen die Entropie und gibt dem letzten Gedanken eine der allgemeinen Form des ersten Satzes entsprechende Gestalt, indem er den zweiten Satz so ausspricht: Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Wie Wärme sich nur in Arbeit verwandelt, wenn ein Uebergang von Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper stattfindet, so kann der Uebergang der Wärme von der Umgebung eines kälteren Körpers auf diesen zur Erzeugung von Arbeit dienen. Dies geschieht in der thermomotorischen Schaukel und dem thermomotorischen Rad von Bernardi (1874) (Fig. 210). Die Schaukel besteht aus einer an beiden Enden nach unten senkrecht umgebogenen Glasröhre, die mit Glaskugeln endigt, luftleer und zu drei Vierteln ihres Raumes mit Aether gefüllt ist. Diese Röhre wird zu einer Schaukel dadurch, daß sie um eine Achse, die an der Mitte der Röhre, in dem Deckel eines wassergefüllten Kastens wagrecht angebracht ist, sich drehen kann. Taucht die eine der beiden verschleierten Kugeln in das Wasser, so befindet sich die andere in der Luft, das Wasser ihres Schleiers verdunstet, ihr Aether condensirt sich durch die entstehende Verdunstungskälte, der Aether in der anderen Kugel aber verdampft durch die Wärme, die fortwährend aus der wärmeren Umgebung in das Wasser übergeht. Der Aetherdampf steigt fortwährend in die hervorragende Kugel, condensirt sich immer und sammelt sich bald dort in solcher Menge, daß diese Kugel in das Wasser sinkt und die andere sich hebt, worauf das ganze Spiel sich in umgekehrter Weise wiederholt; hierdurch entsteht eine schaukelnde Bewegung. Durch Verbindung von 3 solcher Röhren, deren Kugeln nach entgegengesetzten Richtungen abgebogen sind, zu einem Rade (Fig. 210) erhielt Bernardi eine continuirliche drehende Bewegung, welche eine Uhr treibt.

Fig. 210.



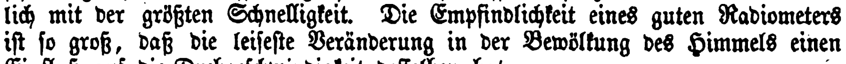
In den angeführten Beispielen für die Leistung von Arbeit durch Wärme findet der hiermit nothwendig verbundene Uebergang der Wärme von einem wärmeren zu einem kälteren Körper in Gestalt von Körperwärme statt, in der Dampfmaschine durch die Verbindung des Dampfes mit dem Kessel einerseits und dem Condensator andererseits, in Bernardis Rad und Schaukel durch die Berührung der wärmeren Luft mit dem kälteren Wasser. Der Uebergang kann jedoch auch durch Strahlung stattfinden; so leistet die Sonne alle Erdenarbeit, obwohl ihre Wärme als Aetherwellenbewegung durch den kalten Weltraum auf die Erde gestrahlt worden ist.

Hierbei wird indeß die lebendige Kraft der Aetherwellen meist erst in Spannkraft z. B. in die des Kohlenstoffs oder die des gehobenen Wassers verwandelt. Eine anscheinend directe Umwandlung von Strahlen in Arbeit geschieht jedoch in dem Radiometer.

Das **Radiometer** oder die **Lichtmühle** (Crookes 1874) besteht in seiner gewöhnlichsten Form (Fig. 211) aus einem Kreuz von Platindraht, dessen 4 Arme an ihren Enden vertikale Blättchen z. B. aus geglühtem Glimmer tragen, welche auf der einen Seite durch einen Ueberzug von Ruß stark absorbirend gemacht sind, während die anderen blank gelassen wurden; und zwar sind alle berußten Seiten nach der einen Drehrichtung, alle blanken nach der entgegengesetzten Seite gewendet. Das Rädchen ist in einen Glasballon von 5—6^{cm} Durchmesser ein=

geschlossen, der durch Anwendung von verbesserten Quecksilberluftpumpen auf den höchsten Grad der Verdünnung der Luft (oder eines anderen Gases) gebracht ist; derselbe geht oben und unten in röhrenförmige Verlängerungen über, aus denen zwei enge genau übereinander stehende Glasröhren ab und cd ragen; die untere ab trägt eine Nadelspitze, auf welcher das Drehkreuz mittels eines Glashütchens schwebt, wodurch die Drehbarkeit hergestellt ist, während das Herabfallen durch die obere Glasröhre cd unmöglich gemacht wird, da ihre untere Mündung d das Glashütchen lose umfaßt.

Fig. 211.



Setzt man das Radiometer den Strahlen irgend einer Licht- oder Wärmequelle aus, so dreht sich das Rädchen, und zwar mit den blanken Flächen voran, so als ob auf die dunkeln Flächen ein Druck oder Stöße ausgeübt würden; auch eine dunkle Wärmequelle z. B. ein warmer Ofen bringt diese Drehung hervor. Die Geschwindigkeit der Drehung steigt mit der Stärke der Strahlung. Ist z. B. bei hereingebrochenem Abenddunkel in einem Zimmer das Mühlchen allmälig zur Ruhe gelangt, so fängt es langsam an zu laufen, wenn in einiger Entfernung eine Lampe angezündet wird; wird es der Lampe näher gebracht, so dreht es sich schneller und immer schneller, bis es eben vor der Lampenglocke angelangt ist; nimmt man die Glocke ab, so läuft es so schnell, daß man die Flügel nicht mehr sehen kann. Hinter einem heißen, dunkeln Regulirofen dreht es sich mit mäßiger Geschwindigkeit, vor dem offenen glühenden Roste desselben plötzlich mit der größten Schnelligkeit. Die Empfindlichkeit eines guten Radiometers ist so groß, daß die leiseste Veränderung in der Bewölkung des Himmels einen Einfluß auf die Drehgeschwindigkeit desselben hat.

Von den zahlreichen Radiometerversuchen mögen noch einige erwähnt werden, die zur Erklärung seiner Erscheinungen nach der mechanischen Gastheorie geführt haben. Die Drehrichtung mit den blanken Flächen voran nennt man positiv, die entgegengesetzte negativ. Taucht man ein Radiometer, das bei gewöhnlicher Temperatur stille steht, in kaltes Wasser, so dreht es sich negativ, und zwar so lange, bis die Temperatur constant geworden ist; nach dem Herausnehmen aber dreht sich die Mühle selbst in der tiefsten Dunkelheit wieder positiv. — Gießt man Aether auf ein in positiver Drehung befindliches Radiometer, so dreht es sich negativ, nimmt aber bald wieder die positive Richtung an, selbst wenn man nochmals Aether aufträufelt. Hieraus könnte man schon vermuthen, daß die Glashülle des Radiometers bei seinen Bewegungen mitwirkt. Es gibt aber eine Reihe von Versuchen, welche entschieden beweisen, daß die Bewegungen nicht unmittelbar durch eine äußere Kraft, wie etwa Stöße der Aetherwellen, hervorgebracht werden, und auch nicht durch eine ausschließlich innere Kraft des Rädchens, wie etwa Elektricität oder von diesem entwickelte Gasströme, sondern daß die Bewegungen herrühren von einer Reaction zwischen dem Rädchen und der Glashülle, welche Gegenwirkung durch die geringe Menge des verdünnten Gases, des Gasresiduums, vermittelt wird. Schuster (1876) hing ein Radiometer bifilar (d. i. an zwei Fäden) in einem größeren Glasgefäße auf, das er hierauf mit der Luftpumpe entleerte. Als nun das Licht einer Knallgaslampe auf das Radiometer fiel, drehte sich das Rädchen positiv, während die Glashülle in negativer Richtung abwich, und bei Abstellung des Lichtes sich positiv drehte. Crookes stellte (1876) einen ähnlichen Versuch mit einer 10armigen Lichtmühle an, in welcher 2 Arme einen langen Magnet bildeten; er setzte den ganzen Apparat in ein Wassergefäß, in welchem nach kräftiger Bestrahlung das Rädchen schnell, die Glashülle aber langsam rotirte, jedoch beide in positiver Richtung. Als nun ein kräftiger Magnet in die Nähe gebracht wurde, stand das Rädchen plötzlich still, die Glashülle aber drehte sich rasch in negativer Richtung, und zwar so lange, als die Kerzen brannten. Cooke beleuchtete (1877) ein Radiometer mittels Knallgaslicht in dreifacher Weise; das erste Mal so, daß nur die berußten Flächen getroffen wurden; das zweite Mal traf das Licht nur die blanken Flächen und im dritten Falle beiderlei

Flächen. In derselben Zeit nun, wo das Rädchen im ersten Falle 232 Rotationen ausführte, vollbrachte es im 2ten 88 und im dritten 319 Drehungen. Wäre die Wirkung einer äußeren Kraft zu verdanken, so müßte im dritten Falle die Wirkung gleich der Differenz der zwei ersten Wirkungen gewesen sein. Es kann demnach die Wirkung nur von einer Reaction der Theile des Instrumentes selbst herrühren, Cooke nennt das Radiometer eine Wärmemaschine, in welcher bei positiver Drehung die berußten Flügel den Heizer, die Glashülle den Kühler bilden, während bei negativer Drehung das Sachverhältniß sich umkehrt. Dafür spricht auch die von Crookes beobachtete Thatsache, daß bei dem Doppelradiometer die Mühle in dem einen Gefäße doppelt so schnell rotirt als in dem anderen doppelt so weiten Gefäße. Daß die Reaction zwischen den Flügeln und der Hülle durch das Gasresiduum vermittelt wird, ist aus der verschiedenen Wirkung bei verschiedener Verdünnung und bei verschiedenen Gasen von gleicher Verdünnung ersichtlich. Die Bewegung des Mühlchens, d. i. die Abstoßung der berußten Flächen findet erst bei großer Verdünnung der Luft im Radiometer statt. Durch verbesserte Luftsauger ist man bis zu 1 Zehnmilliontel Atmosphären der Gasspannung herabgelangt. Bei solchen geringen Spannungen nimmt die Abstoßung bei allen Gasen mit fortschreitender Verdünnung bis zu einem gewissen Maximum zu, welches für Luft, Sauerstoff, Wasserstoff bei einem Drucke von resp. 40, 30 und 50 Milliontel Atm. eintritt, wonach die Abstoßung so rasch abnimmt, daß offenbar bei völliger Luftleere keine Wirkung mehr vorhanden sein kann.

Wenn es hiernach feststeht, daß die bewegungerzeugende Reaction zwischen Glashülle und Flügel durch das Gasresiduum vermittelt wird, so liegt es nahe, diese Wirkung in der molekularen Bewegung der Gase zu vermuthen. Mittels derselben wird die Radiometer-Erscheinung auf folgende Weise erklärt: Da der Ruß die Strahlen am leichtesten absorbirt, so werden offenbar die berußten Flächen stärker erwärmt als die blanken; daher müssen die Gasmoleküle, die gegen die berußten Flächen treffen, mit größerer Geschwindigkeit umkehren, als die Moleküle, welche die blanken Flächen berührt haben; jene Moleküle werden mit einer größeren lebendigen Kraft von den berußten Flächen zurückgeworfen, üben also auch auf diese nach dem Gesetze: actio est par reactioni einen stärkeren Rückstoß aus, treiben daher die berußten Flächen fort, wirken so, als ob diese Flächen abgestoßen würden. Diese Erklärung erscheint sehr einfach, macht auch sofort klar, daß im luftleeren Raume gar keine und im äußerst verdünnten Raume nur eine sehr schwache Wirkung stattfinden kann, sowie warum verschiedene Gase einen verschiedenen Einfluß durch ihre molekulare Bewegung haben, läßt aber noch nicht erkennen, warum die Erscheinungen nur in sehr verdünnten Gasen eintreten und inwiefern eine Reaction der Glashülle im Spiele ist. Bedenkt man jedoch, daß nach den Berechnungen der dynamischen Gastheorie selbst in dem kleinen Raume eines Radiometers bei gewöhnlichem Luftdrucke zahllose Moleküle vorhanden sind, daß also die Wege der einzelnen Moleküle bis zu ihren Zusammenstößen unendlich klein sind, so werden auch die zwei letzten Einflüsse erklärlich werden. Die von einer wärmeren berußten Fläche zurückprallenden Moleküle halten die langsamer nach der erwärmten Fläche hingehenden Moleküle theilweise zurück, so daß dieselben hinter die erwärmte Fläche weiter gehen; daher nimmt die Zahl der die Rußflächen treffenden Moleküle in dem Maße ab, wie die Stärke der einzelnen Rückstöße zunimmt, der Druck auf die Rußfläche ist ebenso groß als der Druck auf die blanke Fläche; es findet keine Bewegung statt. Ist aber die Verdünnung der Luft sehr bedeutend, so fliegen die zurückprallenden Moleküle bis an die Glaswand und geben dieser ihren Ueberschuß an lebendiger Kraft ab, worin die Mitwirkung der Glaswand und die Möglichkeit und entgegengesetzte Richtung ihrer Bewegung erklärt ist. In diesem Falle werden also von einem zurückprallenden und die Glaswand treffenden Moleküle keine vorwärts strebenden Moleküle aufgehalten, die berußte Fläche empfängt ebenso viele Stöße und Rückstöße als die blanke; aber jeder Rückstoß auf die berußte Fläche ist stärker und die immerhin noch zahlreichen Moleküle können durch die Zusammenwirkung ihrer stärkeren Rückstöße die schwarze Fläche forttreiben, das Mühlchen in positiver Richtung drehen. Diese Erklärung von Johnstone Stoney ist von Crookes adoptirt und durch die erwähnten und noch viele anderen Versuche als wahrscheinlich richtig bestätigt worden.

3. Erste Hauptwirkung der Wärme.

Die Ausdehnung.

394 **Bedingung und Ursache der Ausdehnung.** Jede Erhöhung der Temperatur eines Körpers ist mit einer Vergrößerung seines Volumens, mit Ausdehnung verbunden. Dieselbe besteht in einer Vermehrung der Disgregation durch die erhöhte

lebendige Kraft der Theilchen, welcher Vermehrung eine äquivalente Verwandlung von Wärme in Arbeit entspricht, in innere Arbeit, wenn eine Anziehung der Theilchen zu überwinden ist, und in äußere Arbeit, wenn ein äußerer Druck zu überwinden ist; gewöhnlich muß innere und äußere Arbeit geleistet werden. Die Vermehrung der Disgregation geschieht auf folgende Weise: die Gasmoleküle üben durch ihre größere lebendige Kraft einen verstärkten Stoß, einen stärkeren Druck auf ihre Umgebung aus, vermöge dessen dieselbe soweit ausweicht, bis durch Verdünnung die erhöhte Stoßkraft der Moleküle ausgeglichen ist; bei den flüssigen und festen Körpern wird die schwingende Bewegung verstärkt, indem zunächst die Amplituden größer werden und die hierdurch auf einander stoßenden Moleküle sich mehr von einander entfernen. Der Satz: Wärme dehnt die Körper aus, hat verschiedene Umkehrungen; die nächstliegende ist der Satz: Abkühlung bewirkt Zusammenziehung, Verkleinerung des Volumens. Dem Geiste der mechanischen Wärmetheorie entsprechen folgende zwei Umkehrungen: Jede Volumenverkleinerung erzeugt Wärme und jede Volumenvergrößerung Abkühlung; denn erstere ist eine Verminderung, letztere eine Vermehrung der Disgregation; bei ersterer verschwindet, bei letzterer entsteht Arbeit; verschwindende Arbeit aber erzeugt Wärme, entstehende Arbeit verbraucht Wärme.

Einfache Versuche zur Ausdehnung sind: Eine metallene Kugel, welche bei gewöhnlicher Temperatur noch leicht durch einen Ring fällt, geht nach Erhitzung nicht mehr durch denselben. Bläst man an eine enge Glasröhre eine Kugel an (Dilatometer) und füllt dieselbe mit irgend einer Flüssigkeit, so steigt diese bei Erwärmung der Kugel in der Röhre. Wird eine zugebundene Blase auf einen Ofen gelegt, so schwillt sie bis zur Glätte und bis zum Springen an. Bringt man in die Glasröhre des Dilatometers einen Tropfen Quecksilber, so steigt derselbe schon bei Annäherung der Hand an die Kugel.

Gesetze der Ausdehnung. 1. Die Luftarten dehnen sich gleichmäßig aus d. h. für jeden Grad um gleich viel; ihre Ausdehnung ist der Temperatur-Erhöhung proportional; die festen und flüssigen Körper dagegen dehnen sich nicht ganz gleichmäßig aus; die Ungleichmäßigkeit ist um so größer, je näher die Körper einer Aggregatzustandänderung sind. Man unterscheidet bei den festen Körpern die Vergrößerung des ganzen Volumens, die cubische Ausdehnung, von der Vergrößerung der einzelnen Dimensionen, der linearen Ausdehnung; bei den flüssigen und luftförmigen Körpern beachtet man nur die cubische Ausdehnung. Der Ausdehnungs-Coëfficient (α) ist der Bruchtheil des Volumens oder einer Dimension, um welchen sich dieselben bei einer Temperaturerhöhung von 1^0 vergrößern. Ist das Volumen eines Körpers bei 0^0 gleich 1, so ist es nach gleichmäßiger Ausdehnung bei $t^0 = 1 + \alpha t$; die meisten festen und flüssigen Körper folgen aber nicht diesem Gesetze, sondern ihr Volumen ist bei t^0 meistens $= 1 + At + Bt^2$, wo A und B zwei verschiedene Coëfficienten sind; der Ausdehnungs-Coefficient ist also bei höherer Temperatur etwas größer als bei niederer. 395

Für jeden Grad der Temperaturerhöhung steigt auch die lebendige Kraft der Moleküle um einen gleichen Betrag; folglich muß bei vollkommenen Gasen, die bekanntlich nur den äußeren Luftdruck zu überwinden haben, für jeden Grad dieser sich gleich bleibende äußere Druck um einen gleichen Weg zurückgeschoben werden; die Gase dehnen sich gleichmäßig aus. In den flüssigen und festen Körpern dagegen ist außerdem die innere Anziehung zu überwinden, die mit den Abständen der Moleküle sich ändert und bei wachsenden Abständen kleiner wird; daher ist hier die Ausdehnung ungleichmäßig, wird bei höherer Temperatur größer als für dieselbe Erhöhung bei niederer; doch ist diese Veränderung des Ausdehnungs-Coëff. gering, bei gewöhnlichen Versuchen wie sie eben angeführt wurden, unmerklich; auch mit dem Apparate für Ausdehnung der Metallstäbe, die so in einen Spiritustrog gelegt werden, daß ihr eines Ende gegen die feste Wand desselben, das andere aber an den kurzen Hebelarm eines Winkelhebels stößt, dessen längerer Arm ein auf einer Kreistheilung spielender Zeiger ist, kann höchstens eine der Temperatur proportionale Zunahme der Ausdehnung wahrgenommen werden; bei diesem, wie bei den anderen Versuchen kann man aber die sofort mit der Abkühlung wieder erfolgende Zusammenziehung leicht erkennen. Zur Wahrnehmung der Aenderung des Ausd.-Coëff. mit der Temperatur sind genauere

Versuche nöthig, die zahlreich angestellt wurden, und die sämmtlich die Richtigkeit der obigen Formel ergeben, in welcher diese Aenderung ausgesprochen ist.

2. Die Luftarten dehnen sich am stärksten aus, für 100° um etwa 1/3, die flüssigen Körper viel weniger, für 100° um etwa 1/5 bis 1/55, die festen am wenigsten, für 100° um 1/60 bis 1/600.

Dies erklärt sich wieder daraus, daß bei der Ausdehnung der Luftarten nur der äußere Druck, bei den flüssigen und festen Körpern aber auch die Molekular-Anziehung zu überwinden ist, und daß diese in den festen Körpern wegen geringerer Molekularabstände größer ist als in den flüssigen Körpern. Leicht ist dieses Gesetz bei den angeführten Versuchen nachzuweisen. Weil die festen und flüssigen Körper in einem gewissen Volumen viel mehr Moleküle haben, als die luftförmigen Körper, und weil sie sich nur wenig ausdehnen, so ist der Druck, den sie bei der Ausdehnung ausüben, ein sehr großer, fast unüberwindlicher. Auf die in dem Ringe liegende heiße Kugel kann man hämmern, ohne sie durch den Ring zu pressen. Gegen diesen gewaltigen Druck ist der äußere Luftdruck gering; bei der Ausdehnung der festen und flüssigen Körper ist daher hauptsächlich innere Arbeit zu vollbringen.

3. Die Luftarten dehnen sich alle gleich aus und zwar für jeden Grad um 0,003665 oder 1/273 (Gay-Lussacs Gesetz), die flüssigen und festen Körper verschieden z. B. Oele für 100° c^a um 1/12, Wasser um 1/25, Quecksilber um 1/55, Zink und Blei um 1/100, Gold um 1/200, Stahl um 1/300, Glas um 1/400.

Auch hier liegt wieder die Erklärung darin, daß alle Luftarten bei der Ausdehnung denselben äußeren Luftdruck überwinden, die anderen Körper aber ihre höchst verschiedenen inneren Anziehungen. Der exp. Nachweis ist leicht aus den angegebenen Versuchen zu führen. — Die Krystalle der nicht regulären Systeme dehnen sich entsprechend ihrer nach verschiedenen Richtungen ungleichen Dichte auch ungleich in verschiedenen Richtungen aus (Mitscherlich 1823), und zwar die optisch zweiachsigen verschieden nach allen 3 Dimensionen, die optisch einachsigen dagegen gleich in den zur Hauptachse senkrechten Richtungen, mehr oder weniger aber in der Richtung dieser Achse selbst. Beim Beryll ist die Ausdehnung in letzter Richtung so stark, daß in den ersteren Richtungen eine Zusammenziehung stattfindet. Solcher scheinbaren Ausnahmen von dem Gesetze der Ausdehnung gibt es noch mehr. Organische und andere, Flüssigkeiten einschließende, Körper trocknen bei Erhitzung aus und scheinen sich dann zusammenzuziehen; beim Thon wirkt vielleicht eine partielle Schmelzung mit. Die Zusammenziehung von gedehntem Kautschuk durch Wärme erklärt sich nach Govi (1869) daraus, daß Kautschuk eine Art festen Schaums, aus unzähligen Gasbläschen zusammengesetzt ist, die sich beim Dehnen verlängern und beim Erwärmen durch die Expansion des Gases ihre Kugelform wieder herstellen. Wismuth und Eis ziehen sich beim Schmelzen zusammen, was indessen durch das Aufgeben des krystallinischen, viele Lücken bietenden Zustandes erklärlich ist. Auch daß das Wasser von 4° an durch Abkühlung sich ausdehnt, also nicht zusammenzieht, kann in einem schon beginnenden Ordnen der Moleküle zu Krystallkeimen liegen. Ganz unerklärlich aber scheint die Ausnahme des Jodsilbers, das nach Fizeau (1867) sowohl in krystallisirtem und krystallinischem, wie auch in amorphem Zustande sich zwischen — 19° und + 70° bei der Erwärmung zusammenzieht und zwar für 1° durchschnittlich um 0,00 000 173, einen allerdings sehr kleinen Bruchtheil.

Wie von dem Hauptsatze: Wärme vergrößert das Volumen, Ausnahmen bestehen, so finden sich auch solche bei den Umkehrungen Die durch Wärme zusammengezogenen Körper dehnen sich bei Abkühlung theilweise aus; sie erzeugen, wie nach Joule das Kautschuk, durch Ausdehnnng Wärme und durch Zusammenziehung Abkühlung. Ist mit der Ausdehnung weder äußere, noch innere Arbeit verbunden, wie beim Strömen eines absoluten Gases in einen leeren Raum, so findet weder Erwärmung, noch Abkühlung statt. Beispiele für die Umkehrungen und Ausnahmen enthält 389.

Ein von fester Substanz umgebener Hohlraum verändert sich bei Temperaturveränderungen ebenso, als ob er aus der umgebenden Substanz bestände. Zur Erläuterung denke man sich den Querschnitt einer Glasröhre; den concentrischen Kreisring von Glas kann man sich aus unzähligen concentrischen Kreislinien gebildet denken; bei stattfindender Erwärmung verlängert sich jede dieser Glaslinien, wobei sie nach außen rücken muß; und diese Verlängerungen und Hinausrückungen sind dieselben, einerlei ob innerhalb einer solchen noch andere vorhanden sind oder nicht. Der Hohlraum wird also weiter und zwar gerade so viel weiter, als ob er ein Glasstab wäre. Zum experimentellen Nachweis kann man einen mit gefärbter Flüssigkeit gefüllten Glaskolben benutzen, durch dessen Stöpsel eine noch theilweise gefüllte Glasröhre geht. Taucht man denselben in heißes Wasser, so sinkt im ersten Augenblicke die Flüssigkeit, welche scheinbare Zusammenziehung die Vergrößerung des Hohlraumes beweist, die durch die zuerst erfolgende Ausdehnung der Glaswände ge-

schieht. Läßt man den Kolben im heißen Wasser stehen, statt ihn rasch wieder heraus zu ziehen, so steigt die Flüssigkeit in der Röhre wieder und geht weit über den ursprünglichen Stand hinaus, und zwar einfach deßhalb, weil jetzt auch die Flüssigkeit sich durch die eindringende Erwärmung ausdehnt, und zwar als Flüssigkeit stärker als das Glas und daher auch stärker als der Hohlraum, da dieser sich wie Glas ausdehnt.

396 **Die Ausdehnungs-Coëfficienten** der festen und flüssigen Körper. Lavoisier und Laplace (1778) legten Stäbe in ein Wasser- oder Oelbad, mit dem einen Ende gegen einen in Mauerwerk befestigten Stab, mit dem anderen Ende an einen Hebel stoßend, der um seine Achse drehbar ein Fernrohr trug; durch Erwärmung verlängert bewegten die Stäbe den Hebel und drehten dadurch das Fernrohr; die Größe der Drehung wurde an einer entfernt aufgestellten Skala abgelesen und daraus die linearen Ausdehnungscoëff. berechnet. — Neue Methoden sind von Fizeau (1864) und Matthiessen (1867). Fizeau legte dünne Platten der zu untersuchenden Stoffe auf eine Glasplatte und ließ durch beide homogenes Natriumlicht gehen; er erhielt dann gelbe und dunkle Newton'sche Ringe; bei der Erwärmung dehnte sich nun die Platte aus, das dünne Luftplättchen wurde dünner und die Ringe verschoben sich; aus der Größe der Verschiebung berechnete er den Ausdehnungscoëff. — Matthiessen benutzte den Auftrieb in Wasser, der für einen erwärmten Körper wegen seines größeren Volumens größer ist als bei niederer Temperatur; aus der Zunahme des Auftriebes berechnete M. den Ausd.-Coëff. von Metallen und Legirungen. Wir führen einige dieser linearen Coëff. an in Milliontel der Länge: Eis 64, Cadmium 32, Zink 30, Blei 28, Zinn 23, Silber 20, Messing 19, Kupfer 17, Gold 15, Eisen 12, Stahl 11, Platin 9, Glas 8, Holz 3. Für die Legirungen fand M. im Allgemeinen die Coëff. gleich dem arithmetischen Mittel der Coëff. der Bestandtheile. Besonders groß ergaben sich nach Fizeau die Coëff. der Haloidsalze: Chlorkalium 38, Steinsalz 40, Salmiak 63, Chlorsilber 33. — Aus der linearen Ausdehnung ergibt sich leicht die cubische; sie ist nahezu das dreifache der linearen. Ist nämlich die Ausdehnung der Kanten eines Würfels $= x$, so wird der Inhalt 1 desselben $= (1 + x)^3 = 1 + 3x + 3x^2 + x^3$, worin man wegen der Kleinheit von x die höheren Potenzen vernachlässigen kann; das neue Volumen ist daher $= 1 + 3x$, also die cubische Ausdehnung $= 3x$. Obwohl dies nur annähernd richtig ist, so stimmen doch die Resultate der Rechnung mit den Versuchsresultaten. — Merkwürdig ist die Beobachtung von General Baeyer (1867), daß die Ausd.-Coëff. von Eisen- und Zinkstäben im Laufe der Jahre kleiner werden.

Den Ausd.-Coëff. von Flüssigkeiten kann man mittels des sog. Gewichtsthermometers von Gay-Lussac finden; dasselbe besteht aus einem Glasgefäße, dessen Hals an einer Stelle ganz eng ausgezogen ist, so daß sich über dieser Stelle eine Art Trichter befindet. Man füllt das Gefäß mit der Flüssigkeit bis in den Trichter herauf, kühlt bis auf 0° ab, indem man das Gefäß in schmelzenden Schnee stellt, und entfernt dann die noch im Trichter bleibende Flüssigkeit. Dann erwärmt man bis zu einer bestimmten Temperatur und nimmt die ausgetretene Flüssigkeit weg. Aus dem Gewichte der heißen und der kalten Flüssigkeit berechnet man den Coëff. Kopp (1847) benutzte das Dilatometer, eine Röhre mit angeblasener Glaskugel, und Matthiessen bestimmte die Coëff. durch Eintauchen geschliffener Glasstücke in die Flüssigkeit nach seiner Auftriebsmethode. So ergaben sich die cubischen Ausdehnungscoëff. in Milliontel für Aether ca 1500, Weingeist 1000, Brom 1000, Terpentinöl 900, Olivenöl 800, Schwefelsäure 600, Wasser 500, Quecksilber 180. Für viele Flüssigkeiten ist die Ausdehnung so ungleichmäßig, daß zur Darstellung die Formel $v = 1 + At + Bt^2 + Ct^3$ angewendet werden muß; am gleichmäßigsten dehnt sich noch das Quecksilber aus, für dessen Volumen Matthiessen die Formel gibt $v = 1 + 0{,}0001812t$, dessen Ausd.-Coëff. demnach genau $= 181{,}2$ Milliontel $= 1/5555$ ist. Regnault gibt zwar auch eine Formel mit der zweiten Potenz von t, doch ist der Coëff. derselben außerordentlich klein, darf also für die gewöhnliche Anwendung des Quecksilbers zu Barometern und Thermometern außer Acht gelassen werden. Wegen dieser wichtigen Anwendung des Quecksilbers wurde dasselbe am häufigsten untersucht. Dulong und Petit (1816) benutzten das Princip der communicirenden Gefäße; 2 comm. Röhren wurden mit Quecksilber gefüllt, die eine auf 0° abgekühlt, die andere erhitzt; in der letzteren hatte dann das Quecksilber einen höheren Stand; der Höhenunterschied, der genau mit dem Kathetometer beobachtet werden kann, macht die Berechnung der Ausdehnung möglich. Solche Berechnungen ergaben dann, daß die Ausdehnung des Quecksilbers von — 20° bis + 200° ziemlich gleichmäßig ist, und daß sie erst in der Nähe des Gefrierpunktes (— 40°) und des Siedepunktes (+ 357°) ungleichmäßig wird.

397 **Das abweichende Verhalten des Wassers.** Die Ausdehnung des Wassers ist so ungleichmäßig, daß Kopp zur Darstellung derselben zwischen 0° und 100° vier verschiedene Formeln anwendet, welche außer der ersten und zweiten auch noch

die dritte Potenz der Temperatur enthalten. Außerdem zeigt aber das Wasser noch die Abweichung von der allgemeinen Regel der Ausdehnung, daß es bei Erwärmung von 0° bis 4° sich nicht ausdehnt, sondern zusammenzieht, und umgekehrt bei der Abkühlung von 4° bis 0° sich nicht zusammenzieht, sondern ausdehnt, wozu noch die weitere Abweichung tritt, daß es beim Uebergange in den festen Zustand sich nicht wie andere erstarrende Stoffe zusammenzieht, sondern abermals ausdehnt; die Ausdehnung von 4° bis 0° beträgt 139 Milliontel und bei dem Erstarren circa 10%. Das Wasser hat demnach seine größte Dichte, sein größtes spec. Gewicht bei 4°, genauer bei 4,08°; von hier an weiter erwärmt dehnt es sich immer, aber ungleichmäßig aus; zwischen 8 und 9° hat es wieder dieselbe Dichte, dasselbe Volumen wie bei 0°. Ist sein Volumen bei 0° = 1, so ist dasselbe bei 4° = 0,999877, bei 10° = 1,000124, bei 20° = 1,001567, bei 40° = 1,007531, bei 60° = 1,016590, bei 80° = 1,028581, bei 100° = 1,042986, woraus die Unregelmäßigkeit zu erkennen ist. Weidner (1867) fand, daß die Ausdehnung des Wassers in Thermometerröhren, wo es bekanntlich bis — 10° flüssig bleibt, auch noch unter Null fortdauert, durchschnittlich 178 Milliontel für jeden Grad beträgt und mit abnehmender Wärme zunimmt.

Aeltere Untersuchungen, sowie die neueren von Matthiessen geben die Volumina des Wassers etwas größer. Das Verhalten des Wassers läßt sich beobachten an einer mit Wasser von 9° gefüllten Thermometerröhre, deren Kugel man in schmelzendes Eis taucht; man sieht dann das Wasser fallen, dann wieder steigen, bis es bei 0° die Röhre wieder anfüllt. — Das abweichende Verhalten des Wassers ist von großer Wichtigkeit im Haushalte der Natur: ohne dasselbe würden die Seen, Flüsse und Meere im Winter zufrieren und dadurch die Existenz von Wasserthieren und Wasserpflanzen unmöglich machen, sowie zahlreiche andere Unzuträglichkeiten schaffen. Wenn sich nämlich das Wasser an der Oberfläche abkühlt (bei über 4°), so wird es durch Zusammenziehung dichter und schwerer und sinkt zu Boden, während das wärmere Wasser aufsteigt; so kühlt sich allmälig die ganze Menge bis auf 4° ab. Würde sich durch weitere Abkühlung das Wasser abermals zusammenziehen, so würde auch jetzt immer das an der Oberfläche abgekühlte und verdichtete Wasser zu Boden sinken, das wärmere würde sich heben, noch tiefer abgekühlt werden und dadurch wieder sinken, um dem früher gesunkenen Platz zu machen; und so würde sich allmälig alles Wasser bis auf 0° abkühlen. Wäre nun das Eis dichter und dadurch schwerer als Wasser, wie andere Körper im festen Zustande schwerer als im flüssigen sind, so würden die jetzt entstehenden Eismassen auch zu Boden sinken und bald würde die ganze Wassermasse durch die kalte Winterluft in Eis verwandelt sein. Dies Alles ist aber unmöglich, weil das Wasser von 4° das schwerste Wasser ist und weil Eis leichter ist als Wasser von 0°; deßhalb kann nach der Abkühlung von 4° an das Wasser von 3, 2, 1° wegen seiner Leichtigkeit nicht sinken, das schwerere Wasser von 4° bleibt immer auf dem Boden; und wenn sich Eis bildet, so bildet dasselbe wegen seiner Leichtigkeit eine Decke, und die schlechte Leitungsfähigkeit des Wassers und des Eises schützen das Bodenwasser vor einer Erniedrigung seiner Temperatur. In dieser Weise verhält sich aber nur das stehende Wasser; in Flüssen dagegen, wo Strömungen nach allen Richtungen stattfinden, kann an einzelnen Stellen die Gesammtmasse sich bis unter 0° abkühlen; denn das ruhig fließende Wasser, was keine Berührung mit festen Körpern hat, kann eine Temperatur unter 0° annehmen, ohne zu gefrieren; wenn daher an einer Stelle die Gesammtmasse so tief abgekühlt ist, oder wenn das Wasser eine Stromrichtung nach dem Boden zu hat, so tritt durch die Berührung mit dem Boden die Krystallisation ein, es bildet sich Grundeis, das später durch Auftrieb steigt und Bodenkörper mit auf die Oberfläche hebt.

Auch diese molekulare Veränderung, die Ausdehnung bei der Eisbildung, geschieht mit großer Kraft; geschlossene mit Wasser gefüllte Gefäße, selbst Bomben springen beim Gefrieren. Eine eiserne mit Wasser gefüllte und zugeschraubte Flasche springt, wenn man sie in eine Kältemischung legt; dasselbe geschieht, wenn sie mit geschmolzenem Wismuth gefüllt ist; Felsen, deren Spalten und Risse Wasser enthalten, springen beim Gefrieren; kleinere Stücke werden von ihnen abgelöst und dann in ähnlicher Weise, wie auch der gefrorene Bodengrund, weiter zerlegt; auf gleiche Weise beginnt die Verwitterung. Diese Wirkung des Eises ist auch schädlich, indem sie Bäume und Reben sprengt, Straßenpflaster, Schwellen und Mauern zerstört u. s. w.

398 **Der Ausdehnungs-Coëfficient der Luftarten und das Gay-Lussac-Mariotte'sche Gesetz.** Nach den neueren, genaueren Untersuchungen von Rudberg, Reg-

nault und Magnus (1833—42) ist der Ausdehnungscoëfficient der Luftarten α = 0,003665 oder nahezu = $^1/_{273}$. Wenn also ein Gas auf 273° erwärmt wird, so nimmt es das doppelte Volumen ein, bei 2 . 273 = 546° das dreifache Volumen, bei 819° das vierfache Volumen u. s. w.; bleibt aber das erhitzte Gas auf seinem ursprünglichen Volumen, weil es in dasselbe eingeschlossen ist, so ist es bei 273° auf die Hälfte, bei 546° auf den dritten Theil, bei 819° auf den vierten Theil seines bei diesen Temperaturen unter dem gewöhnlichen Luftdrucke natürlichen Volumens zusammengepreßt; folglich wird seine Spannung nach dem Mariotte'schen Gesetze 2, 3, 4 . . . . mal so groß, ist also bei 273° gleich 2 Atm., bei 546° gleich 3 Atm. u. s. w.; man nennt diese Zunahme der Gasspannung mit der Gastemperatur das Gay-Lussac—Mariotte'sche Gesetz. Der mathematische Ausdruck desselben ist $vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t)$, worin p_0 und v_0 die Gasspannung und das Volumen bei 0° und p und v dieselben Größen bei t° bedeuten.

Beweis. Ist das Volumen eines Gases bei $0° = v_0$, so nimmt dasselbe für jeden Grad um den Bruchtheil α zu, vorausgesetzt, daß der anfängliche Druck p_0 unverändert erhalten bleibt; die Zunahme bei t° beträgt daher $v_0 \alpha t$; folglich ist bei t° das Volumen

$$v' = v_0 + v_0 \alpha t \text{ oder } v' = v_0 (1 + \alpha t) \quad . \quad . \quad . \quad (43)$$

Läßt man nun das Gas von dem Volumen v' bis zum Volumen v sich ausdehnen, und zwar so, daß die Temperatur unverändert dieselbe bleibt, was man durch geeignete Wärmezufuhr erreichen kann, so geht der Druck p_0 in p über. Da nach dem Mariotte'schen Gesetze die Volumina in umgekehrtem Verhältnisse zu den Druckkräften stehen, so ist $v' : v = p : p_0$ oder $vp = v'p^0$. Wird hierin statt v' sein eben gefundener Werth gesetzt, so ergibt sich

$$vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t) \quad . \quad . \quad . \quad (44)$$

Von diesem allgemeinen Ausdrucke des Mariotte—Gay-Lussac'schen Gesetzes ist (43) eine specielle Form, die für den Fall gilt, daß während der Erwärmung und Ausdehnung der Druck derselbe bleibe, daß z. B. das Gas in freier Luft erwärmt werde. Ist das Gas eingeschlossen, bleibt also v unverändert, so nimmt (44) die zweite specielle Form an $p = p_0 (1 + \alpha t)$, aus welcher man die Zunahme der Spannung eines Gases mit der Temperatur berechnen kann.

Von den verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Ausd.-Coëff. der Gase sei die von Gay-Lussac und von Magnus erwähnt. Gay-Lussac benutzte ein Dilatometer, in dessen Kugel durch einen in die Röhre gebrachten Quecksilbertropfen trockene Luft abgesperrt wurde; das Verhältniß der einzelnen Skalentheile der Röhre zu dem Volumen der Kugel war vorher genau bestimmt; dann wurde die Kugel in ein Wassergefäß mit Thermometern gebracht und das Wasser erwärmt; aus der Stellung des Tropfens ergab sich dann die Ausdehnung der Luft = 0,325 für 100°. Rudberg bezweifelte zuerst die Richtigkeit dieser Zahl und fand $\alpha = 0{,}00365$. Magnus benutzte ein Fortin'sches Barometer (s. 187.), dessen Barometerröhre oben offen war, und durch dessen Deckel eine zweite Röhre in das Quecksilber hinabging, welche mit dem luft- oder gasgefüllten Glasgefäße in Verbindung stand. Dieses Gefäß wurde durch Bäder abgekühlt oder gewärmt und dadurch das eingeschlossene Gas zusammengezogen oder ausgedehnt; es stieg oder fiel dann das Quecksilber in der zugehörigen zweiten Röhre; man konnte es aber durch Umdrehen der Schraube unter dem Lederbeutel dahin bringen, daß das Quecksilber in dieser zweiten Röhre immer bei einer Marke desselben stand, das also das gekühlte oder erwärmte Gas immer dasselbe Volumen einnahm und demnach bei der Abkühlung eine geringere, bei der Erwärmung eine höhere Spannung hatte, welche der Volumsveränderung proportional sein mußte. Die Veränderung der Spannung und daher auch des Volumens war aus dem Fallen und Steigen des Quecksilbers in der ersten offenen Barometerröhre zu erkennen. Durch solche genaue Versuche fand Magnus, sowie auch Regnault, daß das Gesetz der gleichen Ausdehnung aller Gase nicht absolut genau gilt, und daß die Abweichung eines Gases um so größer ist, je coercibler dasselbe und je näher es der Condensation ist; so fanden sie für Wasserstoff α = 0,003 660, für Stickstoff 0,003 668, für Kohlendioxyd 0,003 690, für Schwefeldioxyd 0,003 845. Diese Abweichung ist durch die innere Arbeit der Atome erklärlich; bei der Erwärmung eines Gases werden auch die Atome in den Molekülen nicht ganz unverändert in ihrer Lage gegen einander bleiben und dadurch eine innere Arbeit vollbringen, welche bei verschiedenen Gasen verschieden ist und daher auch eine etwas verschiedene Ausdehnung für gleiche Erwärmung bewirkt.

Die Formel $p = p_0 (1 + \alpha t)$ macht es möglich, den **absoluten Nullpunkt** zu finden, d. i. diejenige Temperatur, bei welcher ein Körper gar keine

Wärme enthält, bei welcher also seine Moleküle in absoluter Ruhe und in größtmöglicher Nähe bei einander sind; da die Spannung der Gase ein Product der Bewegung der Moleküle ist, so ist bei dem absoluten Nullpunkte die Gasspannung $= 0$, folglich ist $p_0 (1 + 0{,}003665\, t) = 0$; da in dieser Gleichung p_0 einen reellen Werth hat, so ist sie nur möglich, wenn $1 + 0{,}003665\, t = 0$, d. h. wenn $t = -273^0$ ist; der absolute Nullpunkt liegt also bei -273^0 C.; die von diesem Punkte an gerechnete Temperatur ist die absolute Temperatur; die absolute Temperatur ist die lebendige Kraft der Moleküle.

399 **Anwendung der Ausdehnung durch die Wärme.** Die wichtigste Anwendung der Ausdehnung durch die Wärme ist

1. **Das Thermometer** (Drebbel 1605, Fahrenheit 1714). Man benutzt zu dem gewöhnlichen Thermometer (s. 47.) Quecksilber in ein Glasdilatometer gefüllt, weil 1. das Glas sich außerordentlich wenig, das Quecksilber aber im Verhältnisse zum Glase ziemlich beträchtlich ausdehnt, weil 2. das Quecksilber erst bei -40^0 gefriert und bei $+360^0$ siedet, also den Temperaturen des gewöhnlichen Lebens genügt, und weil 3. die Ausdehnung des Quecksilbers zwischen -25^0 und $+200^0$ gleichmäßig erfolgt, was man daraus ersieht, daß sich das Quecksilber, mit einem Luftdilatometer zusammen erwärmt, immer um gleichviel ausdehnt, wenn sich die Luft um gleichviel ausdehnt, deren Ausdehnung bekanntlich gleichmäßig erfolgt. Man hat als feste Grundpunkte den Schmelzpunkt des Schnees oder Eises (Eispunkt, Gefrierpunkt) und den Siedepunkt des Wassers gewählt, weil diese Punkte immer leicht wieder zu bestimmen sind, und weil die Stellung des Quecksilbers an denselben nicht eine vorübergehende, sondern eine länger andauernde ist, was sogleich aus der Bestimmung dieser Punkte hervorgehen wird, weil also dieselben mit großer Schärfe angegeben werden können. Die Bestimmung der Punkte geschieht in der Weise, daß man das Thermometer mit seiner Kugel in eine Schüssel voll Schnee oder gestoßenen Eises in ein warmes Zimmer bringt; es fällt dann zuerst das Quecksilber stark, fängt hierauf allmälig an zu steigen, bleibt aber fest stehen, wenn das Eis oder der Schnee anfangen zu schmelzen, und steht so lange an demselben Punkte, bis aller Schnee, alles Eis geschmolzen ist, selbst wenn man ein Feuer unter die Schüssel bringt; dies ist der Eispunkt. Ist alles Eis geschmolzen, so steigt das Quecksilber und zwar um so rascher, je schneller die Erhitzung erfolgt, bleibt aber wieder stehen, wenn das Wasser zu kochen beginnt, und bleibt genau an derselben Stelle, bis alles Wasser fortgekocht ist, selbst wenn während des Kochens die Kugel allmälig aus dem Wasser heraustritt und nur von den aufsteigenden Dämpfen umhüllt ist; dies ist der Siedepunkt. Der Grund dieses festen Stehenbleibens liegt darin, daß beim Schmelzen wie beim Sieden eines Körpers alle zugeführte Wärme zur Schmelzung wie zur Verdampfung verbraucht wird, aber nicht zur Erhöhung der Temperatur, was später noch genauer zu betrachten ist; wir werden dort auch erfahren, daß der Siedepunkt sich bedeutend mit dem Luftdrucke ändert; deßhalb müssen Thermometer entweder zu einer Zeit angefertigt werden, wenn der Barometerstand 76^{cm} beträgt, oder es muß aus den Tabellen über die Spannung der Dämpfe entnommen werden, bei welcher Temperatur das Wasser siedet, wenn es unter dem augenblicklichen, von 76^{cm} abweichenden Drucke steht; beträgt diese Temperatur etwa 98^0 oder 102^0, so hat man den Raum zwischen dem Eispunkte und dem Siedepunkte in 98 oder 102, nicht aber in 100 Grade zu theilen. Auch der Eispunkt ist nicht ganz unabhängig vom Luftdrucke; doch wird er erst durch einen Druck von 8^{at} um $^1/_{18}{}^0$ erniedrigt; folglich kann dieser Einfluß hier außer Acht bleiben.

Bei der **Anfertigung** des Thermometers muß man sich erst überzeugen, ob das Innere der Röhre vollkommen cylindrisch ist; man bringt einen Tropfen Quecksilber in dieselbe und mißt, ob dieser überall gleiche Länge hat, andernfalls die Röhre zu verwerfen

ist. Dann wird die Röhre in siedender Salpetersäure gebadet, um allen organischen Stoff zu entfernen, mit destillirtem Wasser gewaschen und in einem heißen Luftstrome getrocknet. Alsdann bläst man auf der Glasbläserlampe an beiden Enden Gefäße an, am einen Ende ein geschlossenes, am anderen ein offenes; in das offene wird das wohl gereinigte, gewaschene und getrocknete Quecksilber gegossen und nun die Röhre in die Kohlengluth eines geneigten Verbrennungsofens gebracht; die Luft entweicht durch das offene Gefäß, und beim Abkühlen nimmt das Quecksilber ihre Stelle ein; das Quecksilber muß in der Röhre mehrmals zum Sieden gebracht werden, um jede Spur von Flüssigkeit oder abhärirender Luft zu verjagen. Vor dem Schließen erhitzt man bis zu der höchsten Temperatur, die das Thermometer anzeigen soll, um überflüssiges Quecksilber zu beseitigen, oder man kühlt bis zu dem beabsichtigten Minimum ab, um zu sehen, ob dafür genug Quecksilber vorhanden ist; dann erhitzt man abermals, bis das Quecksilber die ganze Röhre füllt und bläst dieselbe dann schnell zu, damit sie luftfrei bleibe. Nun bestimmt man den Eispunkt durch Einbringen des Gefäßes in schmelzendes Eis. Bei der Bestimmung des Siedepunktes muß bedacht werden, daß siedendes Wasser je nach dem Stoffe seines Gefäßes, nach seiner Höhe und seiner Reinheit den Siedepunkt ändert, daß dagegen die Temperatur des Dampfes hiervon unabhängig ist; man hängt daher das Gefäß in die Dämpfe siedenden Wassers, wozu man eigene Apparate hat. Besser ist es, die mit Quecksilber gefüllte Röhre einige Monate liegen zu lassen, ehe man die festen Punkte bestimmt, weil sonst eine „Erhebung des Nullpunktes" um 1° oder mehr stattfindet, welche von einem Zusammenpressen der luftleeren Röhre durch die äußere Luft herrührt. Ueberhaupt muß man die Richtigkeit der beiden Punkte manchmal controliren, wenn die Beobachtungen wissenschaftliche Genauigkeit in Anspruch nehmen wollen. Für eine solche reicht auch die geometrische Theilung des Zwischenraums der Punkte nicht aus, weil genau cylindrische Röhren äußerst selten sind und demnach gleichen Längentheilen nicht gleiche Volumina entsprechen; man muß daher die Röhre in gleiche Volumina theilen, d. h. calibriren; die einfachste Methode ist folgende: Durch einen kurzen Stoß trennt man von dem Quecksilber eine Säule ab ungefähr gleich der Hälfte der Linie 0—100; diese schiebt man dann so, daß ihr eines Ende das eine Mal an dem Siedepunkt liegt, das andere Ende das andere Mal an dem Nullpunkte; zwischen den nahe beisammen liegenden anderen Säulenenden läßt sich leicht die Mitte angeben, d. i. Punkt 50; ebenso bestimmt man nun Punkt 25 und 75 u. s. w.

Für niedrigere Temperaturen wendet man **Weingeistthermometer** an, welche den Quecksilberthermometern gleich gebaut und gleich construirt sind, aber auch Metallthermometer; dieselben beruhen auf der ungleichen Ausdehnung der Metalle durch die Wärme. Sind 2 gleiche Lamellen verschiedener Metalle vielfach auf einander genietet, so biegt sich das Lineal beim Erhitzen, weil nur so das stärker ausgedehnte Metall seine größere Länge annehmen kann; ist ein solcher Doppelstreifen schon gekrümmt, so verstärkt sich seine Krümmung beim Erhitzen; hat er die Form einer vielfach gewundenen Spirale, deren äußeres Ende fest, das innere aber frei ist und einen Zeiger trägt, so muß sich durch Erhitzen die Zahl der Windungen vermehren, der Zeiger muß sich drehen. Breguets Metallthermometer (1817) besteht aus auf einander gelötheten Plättchen von Platin, Gold und Silber, welche eine Drahtspirale bilden, deren oberes Ende in einem Bügel hängt, während das untere den auf einer Skale spielenden Zeiger trägt; man hat auch Metallthermometer in Dosenform, in denen die Windungen der Spirale in einer Ebene liegen. Solche Metallthermometer kann man auch bei höheren Temperaturen benutzen. Thermometer zum Messen hoher Temperaturen nennt man Pyrometer; sie sind noch wenig befriedigend. Muschenbroek (1750) benutzte die Ausdehnung von Metallstäben, die er durch ein Räderwerk auf einen Zeiger übertrug. — Wedgwoods Pyrometer (1782) bestand aus 2 unter einem Winkel auf eine Messingplatte genieteten Messingleisten und aus Thoncylindern von 1/2" Durchmesser; ein Thoncylinder wurde in das Feuer gebracht, dort verkleinerte er durch Schwinden seinen Durchmesser und ließ sich dann weiter in den Winkel der Leisten einschieben als vorher; aus der Lage des Thoncylinders ergab sich die Temperatur. — Pouillets Pyrometer (1836), auch von ihm Universalthermometer genannt, ist ein Luftthermometer; in den zu prüfenden Raum wird eine Hohlkugel von Platinblech gebracht, die durch eine Platinröhre mit einer von 2 communicirenden, quecksilbergefüllten Glasröhren in Verbindung steht; die Luft in der Platinkugel dehnt sich aus in diese communicirende Röhre hinein, wodurch das Quecksilber in der zweiten, höheren, offenen Röhre steigt; aus dem Steigen findet man die Temperatur. So fand Pouillet: Anfangende Rothgluth 525°, Dunkelroth 700°, Kirschroth 900°, Orangegluth 1100°, Gelbgluth 1200°, Weißgluth 1300°, blendende Weißgluth 1500°. — Pouillets magnetisches Pyrometer besteht aus einem Flintenlauf, der an beiden Enden mit Platindraht zusammengeschweißt ist, welche an einen Thermomultiplicator gehen; das eine Ende wird in den zu prüfenden Raum gebracht, wodurch ein Thermostrom entsteht, der die Magnetnadel ablenkt und hierdurch die Temperatur erkennen läßt.

In Becquerels thermoelektrischem Pyrometer ist eine Combination eines Platin- und eines Palladiumdrahtes angewendet. — Für Temperaturen von 350—500° genügt Alvergniats (1868) Thermometer (Fig. 212) nach Berthelots Angaben. Das Luft einschließende Glasgefäß A wird in die zu prüfende Flüssigkeit, z. B. in eine Retorte, eingesenkt; hierdurch wird die Luft ausgedehnt und dadurch das Quecksilber in der Capillarröhre abba hinabgedrückt; die Stellung seines Spiegels an der Skala gibt sofort die Temperatur. Die Skala ist bestimmt durch Eintauchen von A in schmelzendes Eis 0°, in siedendes Wasser 100°, in siedendes Quecksilber 350°, in kochenden Schwefel 440°. Da das Gefäß B durch das in dem Stöpsel steckende Röhrchen mit der äußeren Luft communicirt, so muß die Skale mittels der Klemme D nach dem Luftdrucke verschoben werden; dies geschieht einfach dadurch, daß man A in Flüssigkeit von bekannter Temperatur bringt und dann die Skale so stellt, daß der Spiegel an diesem Grade steht.

Fig. 212.

Zum Messen des Maximums und des Minimums der Temperatur innerhalb eines gewissen Zeitraumes dient das Thermograph (Rutherford 1794). Das Maximumthermometer ist ein Quecksilberthermometer, in dessen Röhre vor dem Quecksilber ein Eisenstäbchen liegt; beim Steigen wird dieses Stäbchen fortgeschoben, bleibt aber beim Fallen liegen und gibt so die höchste Temperatur an; durch Schütteln oder einen Magnet kann es wieder an das Quecksilber zurückgeführt werden. Das Minimumthermometer ist ein Weingeistthermometer, in welchem innerhalb des Weingeistes ein kleines Glasstäbchen liegt, das beim Fallen von der Flüssigkeitshaut mitgenommen wird und dann beim Steigen liegen bleibt. — Zum Messen von Temperaturdifferenzen dient Leslies (1804) Differentialthermometer, das aus 2 communicirenden Glasröhren mit Glaskugeln besteht, von denen eine berußt ist; der verbindende Theil ist mit gefärbter Schwefelsäure versehen, die bei gleicher Temperatur beider Kugeln beiderseits gleich hoch steht, bei verschiedener Temperatur durch ihre verschiedene Höhe die Temperaturdifferenz angibt. Das feinste aller Thermometer ist die Thermosäule mit Thermomultiplicator, womit sich nach Melloni ein Temperaturunterschied von $^1/_{5000}$° angeben läßt (Radiometer von Crookes 438.).

Fig. 213.

400 2. **Die Compensation.** Durch eine Erhöhung der Temperatur wird das Pendel einer Uhr länger und ebenso an einer Taschenuhr der Durchmesser der Unruhe größer, wodurch die Schwingungen verlangsamt werden und die Uhren nachgehen; im Sommer gehen daher die Uhren nach, im Winter vor, wenn sie nicht mit einer Einrichtung versehen sind, welche den Einfluß der Wärme aufhebt, und die man deßhalb Compensation nennt. Die Compensation des Pendels geschieht durch eine solche Verbindung von Metallstangen von verschiedenen Ausdehnungscoëfficienten, welche die Pendellänge bei allen Temperaturen gleich groß erhält. Fig. 213 stellt ein Compensationspendel vor; das eine Metall ist durch stark ausgezogene, das andere durch gestrichelte Linien angedeutet. Die Pendellänge $L = AK$ sei für 0° durch L_0, für t_0 durch L_t bezeichnet. Offenbar ist $L = AB + CD + EK - EF$, worin die Länge $AB + CD + EK = l$ aus dem einen Metall mit dem Ausdehnungscoëfficienten α und die Länge $EF = l'$ aus dem anderen vom Ausdehnungscoëfficienten β besteht. Sind diese Längen bei 0° durch l_0 und l'_0 bezeichnet, so ist $L_0 = l_0 - l'_0$ und

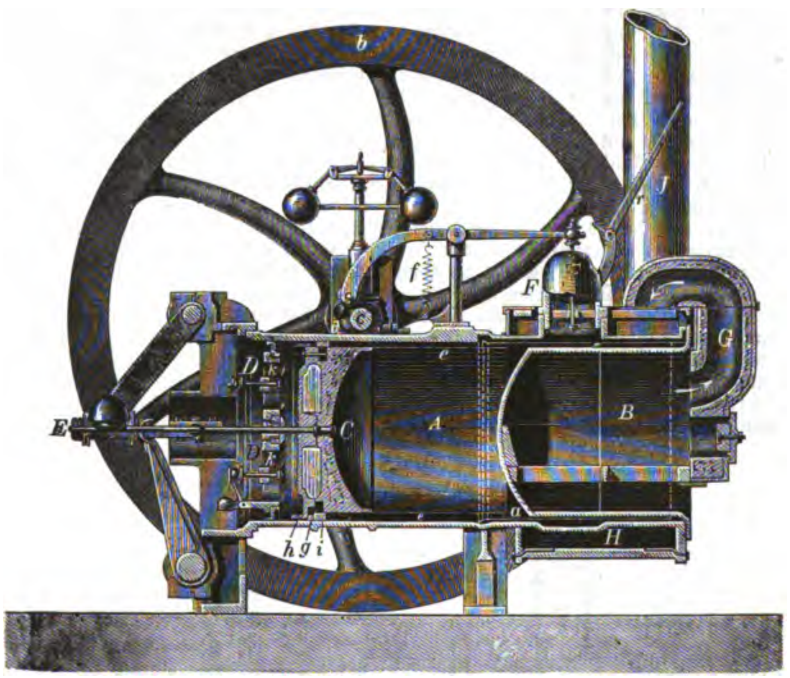
$$L_t = l_0 (1 + \alpha t) - l'_0 (1 + \beta t) = l_0 - l'_0 + t(\alpha l_0 - \beta l'_0).$$

Da nun $L_t = L_0$ sein soll, so muß $t(\alpha l_0 - \beta l'_0) = 0$ sein, d. h. $\alpha l_0 = \beta l'_0$, woraus $l_0 : l'_0 = \beta : \alpha$, d. h. die Längen der verschiedenen Metalle verhalten sich umgekehrt wie ihre Ausdehnungscoëfficienten (Rostpendel, Quecksilbercompensation). Bei den Unruhen geschieht die Compensation durch eine Theilung des Ringes in 2 Halb-

ringe, welche an ihren inneren Enden kleine Gewichte tragen und aus einem Stahl- und einem Messingstreifen zusammengelöthet sind; durch Erwärmung wird zwar der Durchmesser größer, zu gleicher Zeit werden aber auch durch stärkere Krümmung der Halbringe die Gewichtchen mehr nach innen geschoben und bleibt hierdurch das Trägheitsmoment constant.

3. **Die calorische Maschine** (Ericsson 1850). Die calorische oder Heißluftmaschine wird durch die erhöhte Spannung heißer, atmosphärischer Luft getrieben. Die Construction, welche vor etwa 15 Jahren am meisten Eingang im Kleinbetriebe gefunden hatte, aber wegen der durch die Erhitzung der ganzen Maschine und die Erschütterung derselben durch die gewaltigen Ventilschläge bewirkten raschen Abnutzung meist wieder in Abgang kam, ist eine einfachwirkende Kolbenmaschine; d. h. die erhitzte Luft treibt in einem Cylinder einen Kolben vorwärts, der eine Welle und ein auf derselben sitzendes Schwungrad dreht, wodurch ein einseitiges Uebergewicht dieses Rades gehoben wird, das auf der anderen Seite durch seine Fallkraft das Rad und die Welle weiter dreht und dadurch den Kolben wieder zurückschiebt. **401**

Fig. 214.

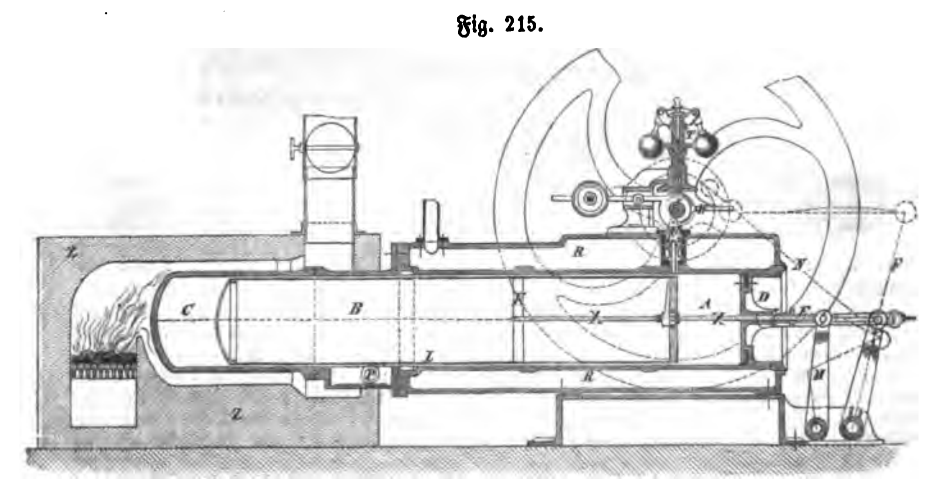


Die Construction und Wirkungsweise wollen wir an Fig. 214 betrachten, welche das Innere des Cylinders und der Kolben durch einen Schnitt darstellt. Der Cylinder A enthält die Feuerbüchse B, aus welcher die Flammengase durch G in einen rings um den Cylinder gehenden Hohlraum H streichen und dann durch den Schornstein J entweichen. Am anderen Ende ist der Cylinder A offen, und in demselben sind 2 Kolben, der Speisekolben C, durch schlechte Wärmeleiter geschützt und einen langen Blechmantel ee tragend, und der Arbeitskolben D mit 2 Ventilen k. An dem Arbeitskolben sind 2 flache Kolbenstangen befestigt (in der Figur nicht sichtbar), welche durch Kurbeln die Welle c und das Schwungrad b in Bewegung setzen und zu gleicher Zeit durch ein sehr finnreiches Hebelwerk die Stange EC und den Speisekolben C so bewegen, daß derselbe den doppelten Hub des Arbeitskolbens D macht und demselben bei Hub und Schub voraneilt; auch trägt der Arbeitskolben einen Ventilring g, der den Zwischenraum zwischen D und C von A abschließt, wenn er an den massiven Vorsprung h stößt, dagegen mit A verbindet, wenn er an den durchbrochenen Vorsprung i stößt, welches abwechselnd stattfindet, je nachdem der Luftdruck von A her größer oder kleiner ist als von dem Zwischenraume CD her; ebenso öffnen sich die Ventile k des Arbeitskolbens bei einem Ueberdrucke von außen und schließen

sich bei einem Ueberdrucke von innen, das Ventil F dagegen wird bei der Drehung der Welle c durch die auf derselben sitzende Nase d geöffnet und durch die Feder F geschlossen. — Wegen des Voreilens des Speisekolbens C beginnt dieser schon seinen Schub, wenn der Arbeitskolben D in dem letzten Stadium seines Hubes angelangt ist; ebenso bewegt sich C rascher voran als D; hierdurch vergrößert sich der Zwischenraum CD, die Luft in demselben verdünnt sich, die Ventile k werden durch den äußeren Luftdruck geöffnet und es strömt Luft ein, das Ringventil aber wird durch den Druck der in A verdichteten Luft geschlossen; die heiße Luft in A strömt deßwegen aus dem Blechmantel um den sehr wenig weiteren zweiten Blechmantel zwischen der Wand der Feuerbüchse und des Cylinders in dem engen Ringraume aa und gibt ihre Hitze an diesen Mantel ab, bis sie endlich durch das rechtzeitige Oeffnen von F ausströmt. Während dessen gelangt der Speisekolben C an das Ende seines Schubes, sein Mantel e umgibt die Feuerbüchse und wird von dem zweiten Mantel umschlossen; in diesem Moment ist der Zwischenraum CD am größten, fängt aber sogleich an kleiner zu werden, weil C seinen Hub beginnt, während D in den letzten Stadien seines Schubes ist; es nähern sich daher C und D einander, dieses Nähern dauert auch während des ganzen Schubes beider Kolben fort, weil C sich rascher als D bewegt. Die Luft in dem Zwischenraume CD wird daher fortwährend verdichtet, die Ventile k schließen sich, das Ringventil g wird geöffnet, während das Ausflußventil F geschlossen ist; folglich strömt die Luft aus dem Zwischenraume CD fortwährend in den Raum a zwischen die 2 Blechmäntel und dann nach A an der Feuerbüchse vorbei, wodurch sie erhitzt und spannkräftig wird, um das Zurückschieben der Kolben vollbringen zu können; denn ihre Spannung wirkt um die Blechmäntel herum und durch das Ringventil auch auf den Zwischenraum CD und so auf den Arbeitskolben D, während sich das Verdichten der Luft in CD durch die Annäherung der Kolben an einander immer fortsetzt und so das Einströmen nach A zwischen den 2 Blechmänteln und der Feuerbüchse immer fortdauert, bis C wieder seinen Schub beginnt.

Wenn auch die Wasser- und Gasmotoren noch so sehr vervollkommnet und für die Kleinindustrie geeignet construirt werden, so sind doch die calorischen Maschinen unersetzlich für solche Orte oder Locale, wo es an Wasser und Gas fehlt. Es sind daher zahlreiche, neue oder veränderte Constructionen erdacht worden, welche, wie die obige, jede Explosionsgefahr ausschließen und daher keiner Concession bedürfen, in welchen jedoch das Bestreben sichtbar ist, die Billigkeit und Leichtigkeit des Betriebes und der Wartung noch zu erhöhen, und die Mängel der ersten Construction, die Erschütterungen der Ventilschläge und die abnützende Erhitzung der ganzen Maschine zu beseitigen. Die Lehmann'sche Heißluftmaschine (1870) ist in mehr als 1000 Exemplaren zu befriedigender Anwendung gekommen, verdient daher eine nähere Betrachtung, wozu die Fig. 215 und 216 dienen sollen;

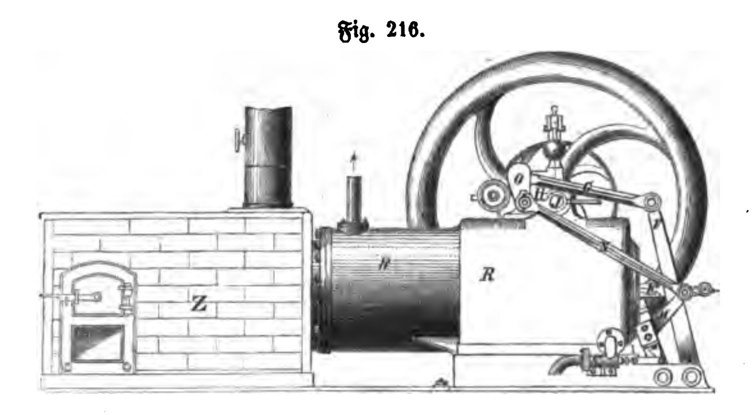
Fig. 215.



erstere stellt einen Längendurchschnitt, letztere eine Seitenansicht der Maschine vor. Der Haupttheil der Maschine ist der gußeiserne Cylinder A, an den sich in gleicher Weite das Zwischenstück B und der Heiztopf C anschließen, welche beiden letzteren Theile in den Ofen Z eingemauert sind und durch die Feuerung so erhitzt werden, daß der Boden des Heiz-

topfes bis zur Rothgluth gebracht wird. Vorn rechts ist der Cylinder A offen und enthält den Arbeitskolben D, der mit einem nach innen gerichteten Lederstulp so abgedichtet ist, daß sich der Lederstulp bei einem äußeren Ueberdrucke öffnet und der äußeren Luft Zugang gestattet, bei einem inneren Ueberdrucke aber fest an die Cylinderwand schließt und der in-

Fig. 216.



neren Luft den Ausgang nicht gestattet. Es arbeitet daher die Maschine fast immer mit derselben Luft, sie bedarf der Ein- und Auslaßventile nicht, wodurch die Ventilschläge wegfallen. Wie dieser große Vorzug der Maschine erreicht wird, ihr ruhiger, geräuschloser Gang, das kann allerdings erst aus den weiteren Constructionstheilen verstanden werden. An den Arbeitskolben D sind zwei Zugstangen E vorn und hinten befestigt und bewegen sich mit ihm hin und her; dadurch wird der gabelförmige Hebel F in wiegende Bewegung versetzt, die sich durch die Leitstange G und die Kurbel H in die drehende Bewegung der Maschinenwelle I und des schweren Schwungrades verwandelt. Durch die Maschinenwelle wird nun eine zweite Kurbel, die Contrekurbel O in Drehung versetzt, wodurch mittels der Leitstange N und des Hebels M eine lange Kolbenstange X in hin- und hergehende Bewegung versetzt wird, die mitten durch den Arbeitskolben D vermittelst einer Stopfbüchse geht und mit einer festen Metallscheibe K endigt. Auf dieser Scheibe sitzt das wesentlichste Element der Maschine, der Verdränger L, ein hohler, vollkommen geschlossener, sehr langer Blechcylinder von solcher Weite, daß zwischen ihm und der Cylinderwand nur eine dünne Luftschicht Raum hat. Derselbe wird durch die Kolbenstange X bewegt, von einzelnen aufgenieteten Führungsstreifen an der Cylinderinnenwand gehalten und von der losen Rolle P getragen. — Der Regulator T öffnet das Ventil U, das einzige Ventil an der Maschine, wenn durch zu starke Feuerung oder durch verringerte Arbeit der Gang zu rasch wird, und läßt etwas Luft aus; auch dient dieses Ventil zum Abstellen der Maschine, indem es mittels des Handhebels W geöffnet wird.

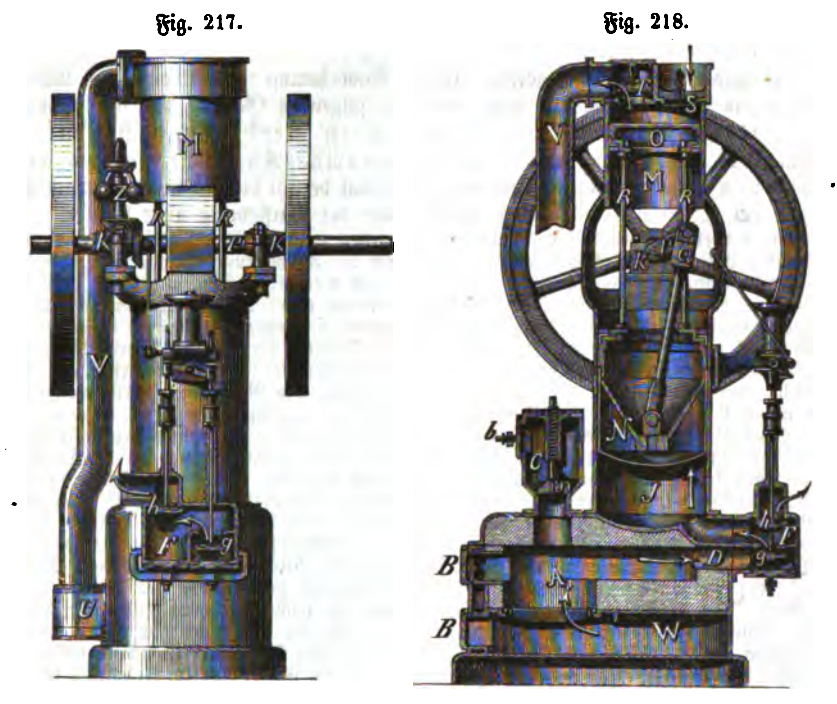
Auch die Lehmann'sche Heißluftmaschine ist eine einfach wirkende, offene calorische Maschine, d. h. die Spannung der heißen Luft treibt den Arbeitskolben nur voran, während die Rückbewegung desselben durch die lebendige Kraft des Schwungrades vollbracht wird, die auch die Bewegung des Verdrängers zu bewirken hat. Die Stellung der beiden Kurbeln, der Hebel und Stangen, sowie die Längen dieser Theile sind so gewählt, daß der Hub des Verdrängers eher beginnt und ca. 1½mal so groß ist als der Hub des Arbeitskolbens. Wenn dieser noch nicht an dem Ende seines Voranganges angelangt ist, beginnt der Verdränger schon seinen Rückgang und treibt dadurch die heiße Luft im Heiztopfe C durch den schmalen Ringraum nach dem Raume A, so daß diese noch auf den Arbeitskolben D vorantreibend wirken kann. Der ganze Ringraum, wie auch der vordere Theil des Cylinders A ist jedoch von dem hohlen Mantel R umgeben, durch welchen fortwährend kaltes Wasser circulirt, das die heiße Luft abkühlt, so daß der Arbeitskolben D nur mit kalter Luft in Berührung kommt, der zweite Hauptvorzug dieser Maschine. Der Rückgang des Verdrängers dauert noch fort und zwar wegen seines größeren Hubes mit größerer Geschwindigkeit, wenn der Rückgang des Arbeitskolbens beginnt, bis fast alle heiße Luft aus dem Topfe C verdrängt und vor dem Verdränger angesammelt ist. Nun beginnt der Vorangang des Verdrängers, während der Kolben noch zurückgeht; bis der Kolben am Ende seines Rückganges angelangt ist, wird das ganze Volumen der vorhandenen Luft fast auf die Hälfte desselben vermindert und dadurch die kalte Luft auf ihre dop-

pelte Spannung comprimirt. Sie strömt daher durch den schmalen Ringraum in das sich immer mehr vergrößernde Volumen des Heiztopfes, wird dort erhitzt und durch die Erhitzung, obwohl sie sich bei der Einströmung ausgedehnt hat, auf ihrer hohen Spannung erhalten oder zu noch höherer Spannung gebracht. Der Heiztopf enthält daher ausgedehnte, aber erhitzte und darum spannkräftige Luft, der Raum A zwischen Verdränger und Kolben jedoch kalte, aber comprimirte und dadurch spannkräftige Luft. Obwohl diese zwei Luftmassen sich wegen des schmalen Ringraumes nicht mischen können, so gleichen sich doch ihre Spannungen aus; es wird daher der Kolben durch kalte Luft vorangetrieben, da auch die Leitungsfähigkeit der Luft zu geringfügig ist, um die Wärme durch den Ringraum fortpflanzen zu können. Demnach beginnt jetzt der Vorangang des Kolbens, Kolben und Verdränger gehen zusammen voran, der letztere aber wegen größeren Hubes schneller als der erstere, so daß die Compression der Luft in dem Raume A, ihr Strömen durch den Ringraum nach C, ihre Erhitzung und dadurch die eben geschilderte Wirkung noch fortdauert, bis der Verdränger seinen Rückgang wieder beginnt; hierbei dehnt sich, weil der Raum A jetzt vergrößert wird, sowie durch den Vorangang des Arbeitskolbens sich das ganze Luftvolumen vergrößert, die Luft stark aus; die überwiegende Luftspannung nimmt daher fortwährend ab, bis sie dem äußeren Luftdrucke gleich ist, womit der Vorangang des Arbeitskolbens zu Ende ist. — Der Lehmann'sche Luftmotor wird in allen Größen bis zu 4 Pferdekräften gebaut, und kann mit jedem Brennmaterial, selbst mit Gerbereiabfällen geheizt werden; die einpferdige Maschine erfordert bei 10stündiger Arbeitszeit durchschnittlich 1 Hektoliter Coaks. Ein Mangel derselben ist offenbar die Nothwendigkeit des Kühlwassers, der allerdings in Geschäften mit Warmwasserbedarf wegfällt.

Der Hock'sche Sparmotor (1876). Den höchsten Grad der praktischen Anwendbarkeit und Billigkeit scheint der Sparmotor von Hock erreicht zu haben, da derselbe mit brennbaren Abfällen jeder Art erhitzt werden kann, z. B. an Coaksabfällen nur 3kg per Stunde und Pferdekraft verbraucht und daher bei täglich 10stündiger Arbeit höchstens 70 Reichspfennige Tageskosten macht. Außerdem nimmt derselbe so wenig Raum ein, daß er in jeder Zimmerecke Platz hat, theilt mit den besten Maschinen dieser Art die Vorzüge leichtester In- und Außergangsetzung und Wartung, keines Dampfes, keines Kessels, keiner Fundamentirung, keiner behördlichen Erlaubniß zu bedürfen, unterscheidet sich vortheilhaft von dem Lehmann'schen Luftmotor dadurch, daß er keines Mauerwerks und keines Wassers bedarf und leicht transportirt werden kann, erreicht aber den fast geräuschlosen Gang dieser Maschine nicht; indessen ist das Geräusch doch verschwindend gegen das der älteren calorischen Maschine und bei städtischem Tageslärm kaum in einem benachbarten Zimmer zu bemerken. Ein besonderer Vorzug ist der compacte und einfache Bau, die Abwesenheit weit ausgreifenden und verletzbaren Hebelwerks, wodurch die Reparaturbedürftigkeit auf ein Minimum reducirt wird. — Der Hock'sche Sparmotor ist auch eine einfach wirkende, offene calorische Maschine aber mit innerer Feuerung, d. h. die treibende Luft geht durch das Feuer selbst, erhält dasselbe, wird hierdurch und durch Mischung mit den Verbrennungsproducten auf den höchsten Hitzegrad gebracht, treibt dann den Kolben und wird ins Freie entlassen. Die Ursache der Billigkeit liegt in dieser inneren Feuerung, die jedoch schon Anfangs der 60er Jahre von Windhausen in Deutschland, Belou in Frankreich und Roper in Amerika angewendet wurde. Ueberhaupt ist der Hock'sche Motor der Roper'schen Heißluftmaschine nachgebildet, unterscheidet sich jedoch von derselben durch seinen einfachen und compacten Bau, durch eine besser geschützte Einrichtung des Arbeitskolbens und durch directe Uebereinandersetzung der drei Haupttheile. Die Figuren 217 und 218 geben eine Ansicht und einen aufrechten Längsschnitt des Hock'schen Motors. In der Ansicht Fig. 217 ist der unterste weiteste Theil der Ofen, der mittlere höhere, etwas engere Theil der Cylinder und der oberste Theil M die Luftpumpe. Diese Anordnung der drei Haupttheile übereinander, die auch aus dem Schnitte Fig. 218 zu ersehen ist, ermöglichte den compacten Bau und den Vorzug, daß der Kolben N, nachdem ihn die heiße Luft hinaufgetrieben hat, durch sein eigenes Gewicht an seinem Hinabtreiben mitwirken kann. Die Luftpumpe M hat die Aufgabe, Luft aus der Atmosphäre anzusaugen, dieselbe zusammenzupressen und durch das Rohr V in den Ofen zu treiben. Zu dem Zwecke steht ihr Kolben O durch eiserne Stangen R mit dem Arbeitskolben N in unveränderlicher Verbindung. Wenn dieser sinkt, so sinkt auch der Luftpumpenkolben O, das Saugventil S öffnet sich und läßt atmosphärische Luft eintreten. Unter dem Luftpumpenkolben O bei M geschieht hierbei nichts, ebenso wenig beim Aufgange desselben, da die Luftpumpe unten, wie der Cylinder oben offen ist. Wenn der Arbeitskolben steigt, so steigt auch der Luftpumpenkolben, drückt die Luft über sich zusammen, wodurch das Saugventil S geschlossen aber das Druckventil T geöffnet und die Luft durch das Rohr V in den Ofen getrieben wird. Hierbei geht die Luft zuerst durch den Registerkasten U, in welchem ein Ventil durch den Schwungkugelregulator Z so gestellt wird, daß bei zu schnellem Gange weniger Luft, bei

zu langsamem Gange mehr Luft in den Ofen eingelassen wird. Aus dem Registerkasten gelangt die Luft in den Vorwärmer und Aschenkasten W und strömt durch die Roststäbe in den Feuerraum A. Derselbe ist mit Chamotte-Steinen ausgemauert und während des

Fig. 217. Fig. 218.



Ganges der Maschine, wie der Aschenkasten durch die Thüren B hermetisch geschlossen. Die Speisung des Feuers geschieht dann mittels des trichterartigen Füllkastens C. Derselbe ist mit Brennmaterial gefüllt und unten durch den Druckkegel n von dem Feuerraume geschieden. Wird dieser Druckkegel mittels der durch den Deckel gehenden Schraubenspindel gehoben, so sinkt der Brennstoff in den Feuerraum. Soll der Füllkasten nachgefüllt werden, so wird der Druckkegel niedergeschraubt und das Material durch die ebenfalls hermetisch verschließbare Thüre b eingeschoben. Auf diese Weise ist die Wirkung der inneren Feuerung ermöglicht, daß die Verbrennungsluft zugleich die Treibluft ist, daß sie in dem Feuerraume verdichtet und spannkräftig sein kann, ohne durch das Feuern u. s. w. entweichen zu können. Demselben Zwecke müssen natürlich auch noch die Einrichtungen zum Weitergehen und Auslassen der Luft angepaßt sein. Die durch Compression und Erhitzung spannkräftige Luft strömt durch den Kanal D und das Einlaßventil g in den Cylinderraum J unter dem Arbeitskolben N, treibt denselben in die Höhe, ohne auf die verletzlichen Theile, die Lederdichtung am oberen Ende wirken zu können, weil sie von derselben durch den langen geschlossenen Blechmantel, der durch Fig. 218 deutlich wird, abgeschlossen ist. Durch das Steigen des Arbeitskolbens wird mittels der an demselben befestigten Schubstange Q die Kurbel P und die Hauptwelle k in Umdrehung versetzt, welche durch die 2 Schwungräder regulirt und durch deren lebendige Kraft während des Kolbenrückganges weiter gedreht wird. Beim Beginne dieses Rückganges wird das Einlaßventil g geschlossen und das Auslaßventil h geöffnet, so daß die Luft in den Schornstein entweichen kann. Die Bewegung dieser zwei in dem Steuerkasten F sitzenden Steuerventile g und h geschieht von der Hauptwelle k aus. Diese setzt durch 2 gezahnte Stirnräder eine kleine Vorlegewelle in Drehung, die in unsere Figuren der Deutlichkeit wegen nicht aufgenommen wurde und auch zur Bewegung des Regulators Z dient. Auf dieser Vorlegewelle sitzt eine kleine Kurbel, welche das in Fig. 218 rechts von Q und in Fig. 217 links unten von R sichtbare Stängelchen in oscillirende Bewegung versetzt und dadurch auch eine kleine Steuerwelle hin- und herdreht, die durch vorgestreckte Daumen die Stangen der Ventile h und g abwechselnd und zur

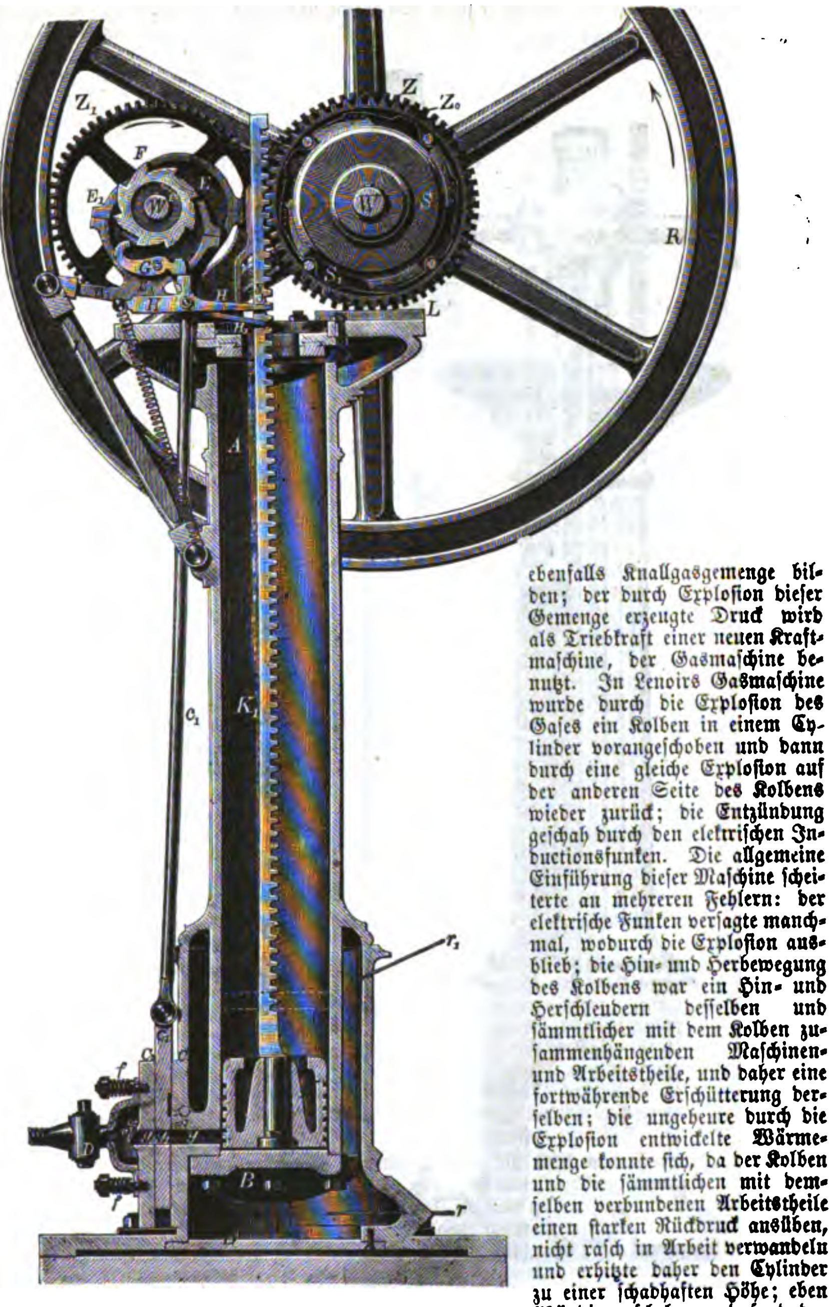
rechten Zeit niederdrückt, die alsdann durch Federn wieder in ihre Sitze zurückgeschoben werden. In der Figur 217 ist rechts von dem Buchstaben V in der Mitte des Cylinders die kleine Steuerwelle mit ihren Daumen links und rechts sichtbar, sowie auch die Verbindung dieser Daumen mit den 2 Stängelchen, welche die Ventile g und h bewegen. Ob diese Theile bei vieljährigem Gebrauche nicht durch die heiße Luft leiden, muß erst noch durch Erfahrung gefunden werden.

402 4. **Das Luftströmungsgesetz.** Auf der Ausdehnung der Luft durch die Wärme beruhen die Luftströmungen. Für diese gilt folgendes Gesetz: Wenn warme und kalte Lufträume mit einander in Verbindung stehen, so strömt die kalte Luft unten in den warmen Raum und die warme Luft oben in den kalten Raum. Hierauf beruht die Wirkung der Lampenröhren, der Ofenrohre und Schornsteine, sowie die Entstehung aller Winde.

Zum **Beweise** des Luftströmungsgesetzes denken wir uns in der Luft ein verticales mit heißer Luft gefülltes Rohr; wegen ihrer durch die Ausdehnung geringeren Dichte hat die Luft in dem Rohre ein geringeres Gewicht l als jede gleich hohe und weite Luftsäule neben ihr; das Gewicht einer solchen Luftsäule, deren obere und untere Grundfläche in derselben Horizontalebene mit der oberen und unteren Oeffnung des Rohres liegen, sei s, so ist $s > l$. Auf den oberen Grundflächen dieser Säulen wie auf der oberen Oeffnung des Rohres ruhen Luftsäulen, die sich bis an die Grenzen der Atmosphäre erstrecken; das Gewicht einer solchen sei a. Folglich herrscht am Fuße des Rohres ein Druck von oben nach unten $P = a + l$ und am Fuße jeder gleich hohen Luftsäule der Druck $P' = a + s$. Der Druck P pflanzt sich von der unteren Rohröffnung auf die Grundflächen aller Luftsäulen fort und wirkt auf dieselben von unten nach oben; ebenso pflanzt sich der Druck P' an die Grundfläche des Rohres fort und wirkt auch dort von unten nach oben; da nun $P' > P$, weil $s > l$, so herrscht am Fuße des Rohres ein Ueberdruck von unten nach oben $= P' - P = s - l$; folglich muß kalte Luft unten in das Rohr strömen. Dieser Druck pflanzt sich aber durch das Rohr auch an die obere Grundfläche fort, wo die sonstigen Pressungen im Gleichgewichte sind; daher fließt oben die heiße Luft mit demselben Drucke $s - l$ aus; die warme Luft steigt also in der kalten nach dem Gesetze des Auftriebes in die Höhe. Der Nachweis des Luftströmungsgesetzes ist leicht zu führen mit einem Lichte in der Thürspalte eines warmen Zimmers; oben biegt sich das Licht nach außen, unten nach innen, in der Mitte der Höhe bleibt es aufrecht. Die Strömung ist um so lebhafter, je größer die Druckdifferenz $s - l$ ist, je wärmer also die innere Luft im Vergleiche zu der äußeren und je höher das Rohr, die heiße Luftsäule ist. Der Zug in Oefen ist um so stärker, je kälter die äußere Luft ist, je stärker das Feuer brennt und je höher der Schornstein ist. Für sehr starke Feuer, für Dampfmaschinen u. dgl. sind daher sehr hohe Schornsteine nöthig; natürlich würde die Höhe ihren Werth verlieren, wenn die heiße Luftsäule sich oben abkühlen würde; Schornsteine bestehen daher häufig aus zwei getrennten Mauerschichten, die durch einen schlechten Wärmeleiter, wie Asche oder eine stagnirende Luftschicht von einander getrennt sind. Indessen ist die Abkühlung der Luft nach oben nicht ganz zu vermeiden, weßhalb sich die Schornsteine nach oben verjüngen, und außerdem mehrt sich die Reibung mit der Höhe, wodurch bei einer gewissen Grenze der Vortheil weiterer Erhöhung schwindet. — In Gebirgsspalten, die nach oben und unten ausgehen, strömt unten kalte Luft aus. — Jede Feuersbrunst erzeugt sich selbst ihren Zug, ihren Wind. Jede ungleiche Erwärmung der Luft bringt Winde hervor; am Tage strömt unten die kältere Seeluft nach dem Lande zu (Seewind), in der Nacht vom kälteren Lande nach der wärmeren See (Landwind); in unserem Frühsommer strömt die Luft von dem kalten Nordmeere nach dem heißen Südost-Continente (Nordwestwind), in unserem Sommer strömt die Luft vom kalten indischen Meere nach dem heißen Südostcontinent (Südwestmonsun), in unserem Winter umgekehrt (Nordostmonsun), zwischen der heißen und der kalten und gemäßigten Zone herrschen fortwährend unten Polarströme, oben Aequatorialströme (Passatwinde, Nordost und Südwest; Näheres Physik der Luft, 600.).

403 5. **Die Explosionen und die Gasmaschine.** (Lenoir 1860, Otto 1865.) Da bei der Verbrennung von Knallgas eine Hitze von 2—3000° entsteht, so würde durch dasselbe das gasförmige Verbrennungsproduct plötzlich auf sein 6—10faches Volumen ausgedehnt, wenn eine solche plötzliche Ausdehnung möglich wäre; weil aber jede Umgebung eine solche plötzliche Ausdehnung verhindert, so erhält das Gasgemenge durch jene Hitze eine Spannung von 6—10 Atm., wie auch leicht durch Benutzung der Formel $p = p_0 (1 + \alpha t)$ sich ergibt. Das wird durch Versuche Bunsens (1867) nachgewiesen, welcher den von einem explodirenden Knallgas ausgeübten Druck durch Gewichte maß, die dasselbe noch eben zu lüpfen vermochte. Das Leuchtgas enthält außer Wasserstoff noch Kohlenwasserstoffe, die

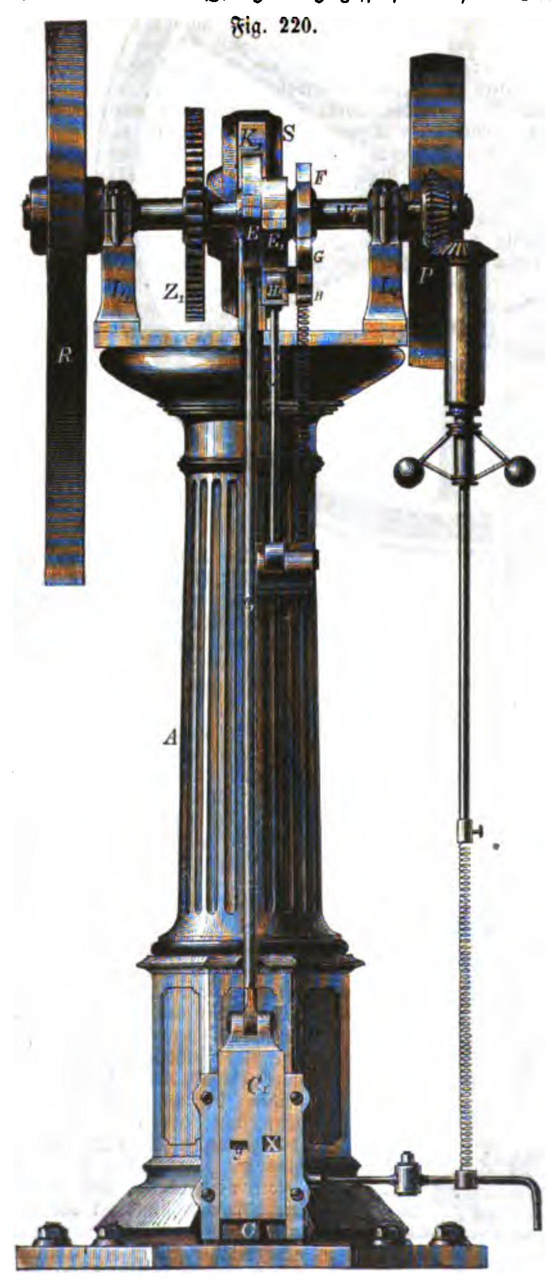
Fig. 219.



ebenfalls Knallgasgemenge bilden; der durch Explosion dieser Gemenge erzeugte Druck wird als Triebkraft einer neuen Kraftmaschine, der Gasmaschine benutzt. In Lenoirs Gasmaschine wurde durch die Explosion des Gases ein Kolben in einem Cylinder vorangeschoben und dann durch eine gleiche Explosion auf der anderen Seite des Kolbens wieder zurück; die Entzündung geschah durch den elektrischen Inductionsfunken. Die allgemeine Einführung dieser Maschine scheiterte an mehreren Fehlern: der elektrische Funken versagte manchmal, wodurch die Explosion ausblieb; die Hin- und Herbewegung des Kolbens war ein Hin- und Herschleudern desselben und sämmtlicher mit dem Kolben zusammenhängenden Maschinen- und Arbeitstheile, und daher eine fortwährende Erschütterung derselben; die ungeheure durch die Explosion entwickelte Wärmemenge konnte sich, da der Kolben und die sämmtlichen mit demselben verbundenen Arbeitstheile einen starken Rückdruck ausüben, nicht rasch in Arbeit verwandeln und erhitzte daher den Cylinder zu einer schadhaften Höhe; eben wegen dieses Rückdruckes konnte die Verbrennung nicht vollständig geschehen und fand daher eine starke Rußbildung statt. Alle diese Nachtheile hat die äußerst sinnreich construirte

Gasmaschine von Langen und Otto nicht. Die Entzündung geschieht durch ein Gasflämmchen, das von einer Zweigleitung gespeist wird; die Gasexplosion wirft den Kolben nur voran, aber in vollkommen leerem Zustande, da ein Schaltwerk ihn während des Hubes ganz von der Verbindung mit den übrigen Maschinentheilen ausschaltet. Diese glückliche Idee hat auch noch den Vortheil, daß die Verbrennungsproducte ihre Wärme fast ganz in Form von Arbeit an den Kolben abgeben; der Kolben fliegt nämlich vermöge seiner lebendigen Kraft noch über die Wirkungsweite der Explosion hinaus, die Gase kühlen sich daher durch ihre Ausdehnung ab und unter dem Kolben bleibt ein luftverdünnter Raum zurück. Durch diese Einrichtung des frei fliegenden Kolbens fallen die Nachtheile der Erschütterungen, der übermäßigen Erhitzung und des dadurch herbeigeführten Wärmeverlustes, sowie der Rußabscheidung weg. Ist nun der Kolben in seiner höchsten Lage angelangt, so wird er durch den äußeren Luftdruck zurückgeschoben, nachdem das Schaltwerk ihn wieder mit den übrigen Theilen gekuppelt hat. Es werden daher diese Theile durch Luftdruck bewegt; der äußere Luftdruck ist die eigentliche Triebkraft dieser Maschine, die daher von dem Erfinder auch „atmosphärische Gaskraftmaschine" genannt wird. Die Einrichtung derselben ist so interessant, daß wir dieselbe an Fig. 219 bis 226 etwas näher betrachten wollen.

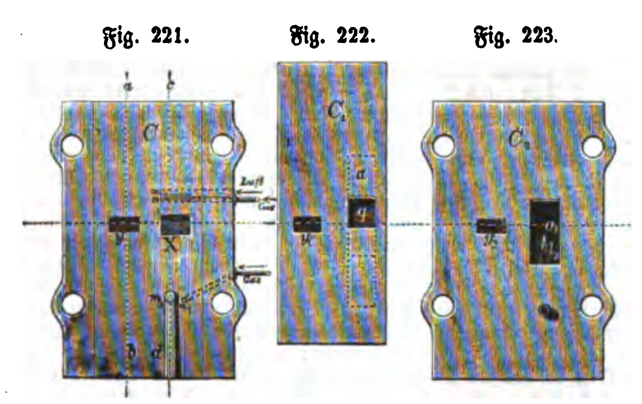
Fig. 220.



In dem Cylinder A wird also der Kolben K und die gezahnte Kolbenstange K_1 durch das explodirende Gasgemenge nach oben geworfen; die Zahnstange dreht hierbei den Zahnkranz Z_0 frei auf der Scheibe S. Dies bewirkt das Schaltwerk, das aus Keilen und Röllchen besteht, die zwischen dem Scheibenumfange und den hierzu nicht concentrischen einzelnen Innenflächen des Zahnkranzes liegen; durch die Drehung des Zahnkranzes links nach oben kommen dünnere Theile des Zahnringes über dünnere Theile eines Keiles, so daß Röllchen und Keile lose liegen, wenn der Zahnkranz rechts herumfliegt, während die Scheibe S mit ihrer Welle W und dem darauf sitzenden Schwungrade R sich

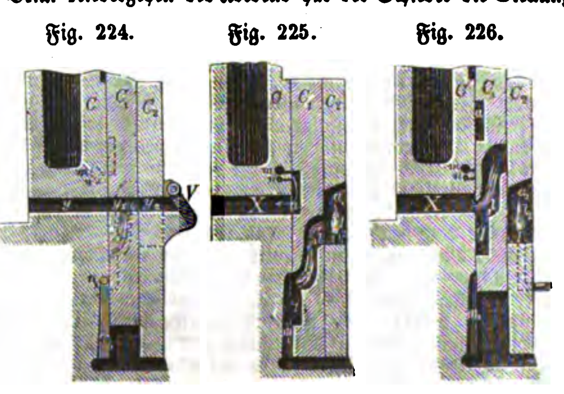
ungestört weiter links herumdrehen. Wenn aber der Kolben niedergeht, so wird auch der Zahnkranz nach links gedreht; es kommen dann sofort dickere Theile des Zahnringes über dickere Theile jedes Keiles, die Röllchen sind fest dazwischen gepreßt, Zahnkranz und Scheibe sind an einander gekuppelt, und die Drehung des Zahnkranzes theilt sich der Scheibe, der Welle W und dem Schwungrade R mit; so wird also durch den Luftdruck das Schwungrad bewegt und hierdurch der Nutzeffect der Maschine sowohl als auch die weitere Bewegung der Maschine selbst bewirkt. Auf der Hauptwelle sitzt nämlich ein zweites Zahnrad Z, welches ein drittes Z_1 und dadurch die Steuerwelle W′ umdreht, auf der zwei excentrische Scheiben E und E_1 lose, das Sperrrad F aber fest sitzen. An dem vorderen Excentrik E_1 ist der federnde Sperrhaken G befestigt, der durch den Hebel H verhindert wird, federnd in das Sperrrad einzugreifen. Wird aber dieser Hebel H durch die Nase N der Kolbenstange im letzten Moment des Niederganges derselben herabgedrückt, so läßt er den Sperrhaken G frei, dieser greift in das Sperrrad ein, wird von demselben mitgedreht und dreht daher auch die zwei Excentriks, an denen er befestigt ist. Mit dem ersten Excentrik E_1 wird der Hebel H_1, der durch das Gelenke J gehalten wird und ebenfalls unter die Nase N greift, gehoben, wodurch auch die Kolbenstange und der Kolben gehoben werden. Ehe wir dieses Heben des Kolbens durch das Excentrik E_1 näher verfolgen, müssen wir die Schieberverhältnisse näher betrachten, die durch Fig. 219 links unten, sowie durch Fig. 221—26 deutlich werden. C ist die an dieser Stelle ebene Cylinderwand, welche die

Fig. 221. Fig. 222. Fig. 223.



Oeffnungen x, y, m, n, m′ und n′ hat, C_1 der mittels der Stange C_1 durch das Excentrik E zu bewegende Schieber mit den Oeffnungen q und y_1, C_2 der Schieberdeckel mit den Oeffnungen y_2 und a_1. Beim Niedergehen des Kolbens hat der Schieber die Stellung Fig. 224, wodurch die Gase ausströmen können. Durch den Hahn D oder durch Verstellung am Regulator kann man dieses Ausströmen verzögern und dadurch den Gang der Maschine langsamer machen; in ähnlicher Weise regulirt dieselbe ihren Gang selbstthätig durch den Schwungkugelregulator. Sowie aber der Schieber C_1 durch das Excentrik E heruntergedrückt wird, hört diese Verbindung auf; dagegen stellt jetzt (Fig. 225) der muschelförmige Einschnitt a des Schiebers die Verbindung her zwischen den Luft- und Gaseinströmungs-Kanälen m und n einerseits und dem Cylinderwandkanal X anderseits; dies geschieht in demselben Moment, wo der Kolben durch das Excentrik E_1 und den Hebel H_1 gehoben, also ein luftleerer Raum unter dem Kolben geschaffen wird; hierdurch wird das Gasgemenge in diesen Raum eingesaugt. Zu

Fig. 224. Fig. 225. Fig. 226.



gleicher Zeit kommt der Schieberraum q mit m, und n, ebenfalls Luft- und Gaskanälen, in Verbindung, aber auch mit der Oeffnung a, im Schieberdeckel, in welcher das Gasflämmchen l_1 brennt. Das in q einströmende Gemenge entzündet sich deßhalb zu dem Flämmchen l_1, das den Kanal q füllt. Nun wird durch das Excentrik E der Schieber gehoben, und die Flamme l_1 gelangt, eingeschlossen zwischen Cylinderwand und Schieberdeckel, gefahrlos bis an den Kanal X, schlägt durch diesen unter den Kolben und entzündet so das Gemenge, wodurch der Kolben in die Höhe fliegt (Fig. 226).

Diese Gasmaschine verbraucht für eine Pferdekraft täglich 1/4 bis 1/2 Thlr. Gas, liefert also die nach dem Hock'schen Sparmotor billigste Kraft. Ihre Wartung ist außerordentlich leicht, sie bedarf keines Heizens, erfordert also nicht einen eigenen Maschinenwärter. Sie hat keine Explosionsgefahr, beseitigt daher die mit Dampfmaschinen verbundenen Plackereien mit Nachbarn und der Obrigkeit. Sie bedarf keiner langwierigen Vorbereitungen und kann jeden Augenblick außer Gang gesetzt werden. Sie macht mehr Procente der in der Wärme enthaltenen Arbeit nutzbar als jede andere Maschine; diese Vorzüge haben derselben jetzt schon, seit wenigen Jahren eine allgemeine Verbreitung verschafft und sichern ihr eine große Zukunft. „Otto's neuer Motor" soll freier von dem schlagenden Geräusch der atmosphärischen Gastriebkraftmaschine sein.

404 Aufg. 599. Welche Wärmemenge wird erzeugt, wenn ein Bleiklumpen von 100kg 100m hoch herabfällt? Aufl.: 23,6c. — A. 600. Allgemein zu lösen? Aufl.: ph.: 424c. — A. 601. Eine Geschützkugel von 100kg schlägt gegen eine Gußstahlpanzerplatte mit einer Geschwindigkeit von 600m, ohne einzudringen oder zurückzuprallen; welche Wärmemenge erzeugt sie? Aufl.: 4245c. — A. 602. Allgemein pv^2:8480c. — A. 603. Ein Asteroid von 1000kg verliert in der Luft von seiner Geschwindigkeit 1 Meile; welche Wärme entwickelt derselbe? Aufl.: 6,5 Mill. Cal. — A. 604. Wenn die Erde in die Sonne stürzen würde, welche Wärme würde sie erzeugen? Aufl.: Gewicht der Erde an der Sonne = 7 Quadrillionen × 28 Kil.; unter der Annahme, daß die Erde, um ihre jetzige Geschwindigkeit zu erlangen, aus einer 3mal größeren Entfernung von der Sonne nach ihrer jetzigen Stellung hätte fallen müssen, ergibt sich die Wärmemenge = 280 000 Quintillionen Cal., eine Wärme, welche für 93 Jahre Sonnenstrahlung ausreicht. — A. 605. Welche Wärme erzeugt die Verbrennung von 10kg Kohlenstoff? Aufl.: 80 000c. — A. 606. Wenn Leuchtgas per 1kg 6000c entwickelt, welche Arbeit könnte dann bei vollkommener Ausnutzung 1kg Leuchtgas erzeugen? Aufl.: 2 544 000mk. — A. 607. Welche Arbeit 1kg Steinkohle, wenn deren Verbrennungswärme = 7500c? Aufl.: 3 180 000mk. — A. 608. Wenn eine Dampfmaschine zur Erzeugung einer Pferdekraft in jeder Stunde 9kg Steinkohle verbraucht, wieviel Prozent der Wärmekraft werden dann zu Arbeit? Aufl.: 9kg geben in 1 Stunde 67 500c, in 1 Secunde 18c = 7632mk; es entstehen aber nur 75mk also noch nicht 1% Leistung. — A. 609. Die Otto-Langen'sche Gasmaschine verzehrt für 1c in 1 Stunde 0,8kg Gas; wieviel % leistet sie? Aufl.: 13%. — A. 610. Wie groß ist die Verbrennungstemperatur des reinen Kohlenstoffs, wenn die specifische Wärme des Kohlendioxyds = 0,2 ist? Aufl.: 1kg C bildet 3⅔kg CO^2, und 8000c; daher enthält 1kg CO^2 2200c; hieraus die Verbrennungstemperatur = 11000°. — A. 611. Eine Eisenbahnschiene ist bei 0°C. 3m lang; wie lang ist sie bei 30°C. Aufl.: 3m 1mm. — A. 612. Wie lang ist ein Körper bei t^0, wenn seine Länge bei $0^0 = l$ und sein Ausd.-Coëff. $= \alpha$ ist? Aufl.: $l' = l(1 + \alpha t)$. — A. 613. Eine Zinkstange ist bei 100° 334cm lang; wie lang ist sie bei 0°? Aufl.: 333cm. — A. 614. Wie lang ist ein Körper bei 0°, dessen Länge bei $t^0 = l'$ ist? Aufl.: $l = l' : (1 + \alpha t)$. — A. 615. Zwei 10m von einander entfernte Wände sind um 6cm aus einander gewichen; man will sie durch die Zusammenziehung eines heißen Eisenankers wieder zurückführen; auf welche Temperatur müssen die Eisenstangen vor der Verankerung erhitzt werden? Aufl.: 500°. — A. 616. Wie groß ist der Flächeninhalt einer Platte bei t^0, wenn bei 0° ihre Länge und Breite beziehentlich l und b sind? Aufl.: $f = lb(1 + \alpha t)^2 = lb(1 + 2\alpha t)$ annähernd. — A. 617. Wie groß ist eine Silberplatte bei 300°, wenn bei 0° ihre Länge und Breite 200mm betragen? Aufl.: 404,8qcm. — A. 618. Der Ausd.-Coëff. von Sandstein ist 12 Milliontel; um wieviel dehnt sich ein Block von 1cbm von — 10° bis 30° aus? Aufl.: 1440ccm. — A. 619. Ein Glasgefäß hält bei 0° gerade 1cbdm Wasser; wieviel bei 100°? Aufl.: 1,0024cbdm. — A. 620. Wenn der Ausd.-Coëff. des Holzes für 1°C 0,00000375 beträgt, wie groß ist derselbe für 1°R? Aufl.: 0,00000469. — A. 621. Welchen Raum nimmt 1l Quecksilber von 0° bei 100° ein? Aufl.: 1018,2ccm. — A. 622. Wenn die Dichte des Quecksilbers bei 0° = 13,59 ist, wie groß ist dieselbe bei 200°? Aufl.: 13,11. — A. 623. Wie groß ist die Dichte eines Körpers bei t^0, wenn sie bei 0° = d ist? Aufl.: $d' = d : (1 + \alpha t)$. — A. 624. Wie groß ist der Barometerstand von 760mm bei t^0 auf 0° reducirt? Aufl.: $h' = 760 : (1 + 0{,}0001812t)$, nahezu $= 760 (1 - \frac{1}{5555}t)$. — A. 625. Für 20° die genaue und die genäherte Rechnung auszuführen. Aufl.: 757,255 und 757,261. — A. 626. Wie groß ist der Ausd.-Coëff. des Quecksilbers für 1°R? Aufl.:

$^1/_{4444}$. — A. 627. Wie groß ist das specifische Gewicht einer Flüssigkeit bei 0°, wenn es bei t° = s ist? Aufl.: $S' = s(1 + \alpha t)$. — A. 628. Wieviel Schwingungen macht ein bei 0°C l^m langes Pendel bei t° in 1 Stunde? Aufl.: $n = 3600 : (\pi \sqrt{(l(1 + \alpha t) : g)})$. — A. 629. Wieviel Schwingungen macht ein messingenes Secundenpendel von 0,994^m Länge bei 0° per Tag weniger, wenn die Temperatur 20° ist? Aufl.: Statt 86400 nur 86383, also 17 weniger; in 7 Tagen geht die Uhr um 2 Minuten nach. — A. 630. Welchen Raum nimmt 1^l Gas von 0° bei 100° ein? Aufl.: 1366,5^{ccm}. — A. 631. Welche Spannung hat eingesperrte Luft bei 200°? Aufl.: 1317^{mm} Quecksilber. — A. 632. Wenn die Dichte eines Gases bei 0° und 760^{mm} Luftdruck = d ist, wie groß ist sie beim Barometerstand h und der Temperatur t? Aufl.: $d' = d(h : 760) : (1 + \alpha t)$. — A. 633. Arago und Biot bestimmten 1806 die Dichte der Gase folgendermaßen: Ein Ballon gefüllt mit Luft beim Barometerstand H und der Temperatur t wog P Kil., ausgepumpt bis zur Spannung h nur noch p Kil.; mit Gas gefüllt bei der Spannung H′ und der Temperatur t′ aber P′ Kil., wieder ausgepumpt noch p′ Kil. Die Dichte des Gases zu bestimmen?

$$\delta = \frac{(P' - p')(H - h)(1 + \beta t)(1 + \alpha' t')}{(P - p)(H' - h')(1 + \beta t')(1 + \alpha t)}$$

worin α, α' und β die Ausd.-Coëff. der Luft, des Gases und des Glases sind.

4. Zweite Hauptwirkung der Wärme.

Die Aggregatzustände.

Es gibt 4 Aggregatzustandsänderungen. 1. Der Uebergang eines Körpers aus dem festen in den flüssigen Zustand, die Schmelzung. 2. Der Uebergang eines Körpers aus dem flüssigen in den festen Zustand, die Erstarrung. 3. Der Uebergang eines flüssigen Körpers in den luftförmigen Zustand, die Verdampfung. 4. Der Uebergang eines luftförmigen Körpers in den flüssigen Zustand, die Verdichtung oder Condensation. 405

1. Die Schmelzung. Damit ein fester Körper in den flüssigen Zustand übergehe, ist eine bestimmte Temperatur desselben nöthig, die man Schmelzpunkt nennt; außerdem muß demselben während des Schmelzens eine gewisse Menge von Wärme zugeführt werden, die durch das Schmelzen verbraucht wird, ohne die Temperatur des schmelzenden Körpers zu erhöhen, und die man Schmelzwärme (früher latente oder gebundene Wärme) nennt.

Um nämlich einen Körper zu schmelzen, müssen die Moleküle desselben so weit aus einander getrieben werden, daß die Anziehung derselben gegen einander nahezu gleich Null ist; dieses Auseinandertreiben ist eine Arbeit, welche von der lebendigen Kraft der Moleküle geleistet werden muß. Wenn aber durch irgend eine Kraft eine Arbeit geleistet werden soll, so muß diese Kraft eine gewisse Höhe erreichen; z. B. wenn wir einen schweren Stein auf einer Unterlage fortschieben wollen und mit einer zu geringen Anstrengung der Muskeln an die Arbeit gehen, so sind wir genöthigt, unsere Anstrengung immer mehr zu verstärken, bis sie endlich die zur Ueberwindung der Reibung nöthige Höhe erreicht; dann erst kann die Muskelanstrengung die Arbeit leisten, und durch die Reibung wird alle Arbeit der Muskelanstrengung aufgezehrt; während aber die Muskelanstrengung diese Arbeit vollbringt, ist keine Steigerung derselben nothwendig, ja nicht einmal möglich (Axiom 5). — Ebenso muß auch, um das Auseinandertreiben der Moleküle vollbringen zu können, die lebendige Kraft der Moleküle, d. i. die Temperatur bis zu einer gewissen Höhe gesteigert werden, bis sie endlich dem Widerstande, den die Molekularanziehung hervorruft, gewachsen ist. Diese Temperatur ist der Schmelzpunkt. Ist diese Temperatur erreicht, so ist damit die Arbeit des Auseinandertreibens noch nicht geleistet, sie muß erst noch geleistet werden, und durch die Arbeitsleistung wird lebendige Kraft, d. i. Wärme verzehrt; diese verzehrte Wärme ist die Schmelzwärme. Während dieser Leistung aber ist eine Steigerung der lebendigen Kraft nicht nothwendig, ja nicht einmal möglich; denn die auseinandertreibende Kraft und die auseinandertreibende Bewegung sind hier congruent, das Auseinandertreiben geschieht dadurch, daß jede unendlich kleine Steigerung der Bewegung sofort die Moleküle noch weiter von einander entfernt und sich dadurch in Arbeit verwandelt; es wird also während des Schmelzens alle zugeführte Wärme zur Arbeit, nicht aber zur Steigerung der Temperatur verwendet. Die Schmelzwärme wird verzehrt, ohne die Temperatur zu erhöhen;

während des Schmelzens ändert sich trotz Wärmezufuhr die Temperatur des schmelzenden Körpers nicht: Der Schmelzpunkt ist constant. — Nach dieser Erklärung der Schmelzerscheinungen müßte jede Schmelzung mit einer Ausdehnung verbunden sein; dies ist auch meistens der Fall. Ausnahmen finden sich bei einigen krystallinischen Körpern, wie Eis, Wismuth, die sich beim Schmelzen zusammenziehen und umgekehrt beim Erstarren ausdehnen. Dies kommt aber einfach davon her, daß diese krystallinischen Körper aus kleinen Krystallen, Krystallkeimen, in solcher Weise zusammengestellt sind, daß diese durch ihre eigenthümliche Form bei der Zusammenstellung zahlreiche Lücken bilden; diese Lücken werden beim Schmelzen wegen der absolut leichten Verschiebbarkeit der Moleküle im flüssigen Zustande ausgefüllt und bewirken daher trotz des größeren Raumes, den jeder zerfallende Krystallkeim ausfüllt, eine Verkleinerung des Volumens.

406 a. **Der Schmelzpunkt** (Deluc 1790) ist bei einem und demselben Körper constant und bei verschiedenen Körpern verschieden, da die bei der Schmelzung zu überwindende Anziehung bei verschiedenen Körpern verschieden ist. Bei vielen Körpern liegt er innerhalb der durch gewöhnliche Mittel erreichbaren Temperaturen, manche, wie Platin, Quarz, Kalk, sind erst im Knallgasgebläse, andere, wie Silicium, Titan, Magnesia erst durch den stärksten elektrischen Strom schmelzbar, manche, wie Kohle, zeigen auch dann nur ein leichtes Anschmelzen, andere, wie Osmium, sind ganz unschmelzbar. Viele Körper sind bei gewöhnlicher Temperatur flüssig, haben also ihren Schmelzpunkt nahe bei oder unter 0°; viele Gase sind noch nicht im festen Zustande dargestellt worden, ihr fester Zustand hat also einen unbekannten Schmelzpunkt tief unter 0°. — Der Schmelzpunkt wird durch Erhöhung des äußeren Druckes erhöht, aber nur um wenig. — Die Legirungen haben einen niedrigeren Schmelzpunkt als das arithmetische Mittel ihrer Bestandtheile, ja er liegt meist sogar niedriger als die Schmelzpunkte der Bestandtheile.

Die Unveränderlichkeit der Schmelztemperatur zeigt besonders schön der Versuch für die Bestimmung des Gefrierpunktes am Thermometer (s. 401.). — Despretz bedurfte zum Anweichen und Krümmen eines Stückchens Kohle im stickstofferfüllten Raume einer Batterie von 500—600 Bunsen'schen Elementen, Magnesia schmilzt mit 187 Elementen, Iridium, Rhodium, Thonerde und andere strengflüssige Erden schmelzen im Knallgasgebläse. Hohe Schmelzpunkte wurden von Pouillet mit Hülfe seines Pyrometers bestimmt:

Schmiedeeisen	1600°	Wismuth	265°	Butter	32°
Stahl	1400	Zinn	230	Rüböl	1
Gußeisen	1200	Schwefel	111	Eis	0
Gold	1200	Natrium	90	Terpentinöl	—27
Kupfer	1050	Stearin	70	Quecksilber	—39
Silber	1000	Wachs	68	Kohlendioxyd	—58
Cadmium	500	Wallrath	47	Ammoniak	—75
Zink	360	Phosphor	43	Schwefelwasserstoff	— 86
Blei	330	Talg	40	Stickoxydul	—100

J. Thomson und Clausius (1850) schlossen die Erhöhung des Schmelzpunktes durch Vergrößerung des äußeren Druckes aus der mechanischen Wärmetheorie. Alle Körper nämlich, die sich beim Schmelzen ausdehnen, haben dabei eine äußere Arbeit zu vollbringen, nämlich den Luftdruck um den Betrag der Ausdehnung zurück zu schieben; wird dieser äußere Druck größer, so wird die Fähigkeit, denselben zu überwinden, erst durch Erhöhung der lebendigen Kraft erreicht, und diese erhöhte lebendige Kraft muß dann auch eine größere Arbeit leisten; es wird also sowohl der Schmelzpunkt als auch die Schmelzwärme durch Druck erhöht. Für den Schmelzpunkt haben Bunsen und Hopkins diese Folgerung richtig befunden. Bunsen fand, daß Wallrath unter 1^{at} bei 18°, unter 156^{at} bei 51° schmelze. Hopkins fand für 519^{at} 60°, für 792^{at} 80; der Schmelzpunkt des Schwefels war bei diesen Pressungen 135° und 141°. — Dieses Eintreffen von theoretisch gefundenen Eigenschaften ist eine wesentliche Stütze der mechanischen Wärmetheorie. Noch glänzender aber bewährte sich dieselbe bei dem Wasser. J. Thomson und Clausius folgerten nämlich aus dem Zusammenziehen des Eises beim Schmelzen ein umgekehrtes Verhalten für dasselbe, nämlich eine Erniedrigung des Schmelzpunktes durch den Druck und berechneten diese Erniedrigung sogar, für 1^{at} $^1/_{144}$°. Schmelzendes Eis hat nämlich nicht blos keine äußere Arbeit zu leisten, da es keinen Druck zurückzuschieben hat, sondern es nimmt im Gegentheile äußere Arbeit auf, die in Wärme verwandelt eine geringere Wärmezufuhr nöthig macht; der äußere Druck wirkt eben dahin, wohin auch die innere Wärme wirkt, nämlich auf das

Zerfallen der Krystallkeime. Da nun der äußere Druck hier in demselben Sinne wie die lebendige Kraft der Moleküle, wie die Temperatur wirkt, so ist bei erhöhtem Drucke eine geringere Temperatur nothwendig. Indessen kann diese Erniedrigung, wie die vorhin betrachtete Erhöhung nur gering sein, weil die Molekularkräfte in festen Körpern gegen jeden äußeren Druck bedeutend überwiegen; die innere Arbeit ist viel größer als die äußere. Auch diese Folgerungen aus der Theorie wurden bewährt. W. Thomson stellte ein äußerst empfindliches Aetherthermometer in eine Mischung von Eis und Wasser und fand beim Zusammenpressen durch 8^{at} ein Fallen um 7,5°, durch 17^{at} um 16,5, was eine Erniedrigung des Schmelzpunktes um 0,0575 und 0,1287° C. am gewöhnlichen Thermometer anzeigt; der Gefrierpunkt des Wassers wird also durch 1^{at} um 0,0075° erniedrigt. Entsprechend zeigte Mousson (1858), daß comprimirtes Wasser erst bei niedrigeren Temperaturen gefriere; bei $13\,000^{at}$ erst bei — 18°, und daß umgekehrt Eis unter 0° durch Zusammenpressen flüssig werde.

Für die Erniedrigung des Schmelzpunktes der Legirungen, welche sich nach Matthiessen durch die geringere Anziehung verschiedenartiger Moleküle gegen einander erklärt, sprechen zahlreiche Versuche. Eine Legirung von 1 Zinn und 6 Blei schmilzt bei 270°, 1 Zinn und 2 Blei bei 227°, 1 Zinn und 1 Blei bei 189°, 2 Zinn und 1 Blei bei 171°, 3 Zinn und 1 Blei bei 180°, 6 Zinn und 1 Blei bei 194°, 1 Wismuth, 1 Blei und 1 Zinn bei 125°; 8 Wismuth, 8 Zinn und 3 Blei (Rose'sches Metall) bei 94,5°; 8 Wismuth, 2 Cadmium, 2 Zinn und 4 Blei (Woods Legirung) bei 65—71°; die Legirung von Lipowitz (15 Bi, 4 Sn, 8 Pb, 3 Cd) schmilzt bei 60°. Auch Gemische von fetten Säuren zeigen diese Erniedrigung (Heintz 1854). Stahl ist leichter schmelzbar als Eisen, obwohl er den fast unschmelzbaren Kohlenstoff enthält; die Flußmittel und Zuschläge beim Erzschmelzen sind oft für sich nur im Knallgasgebläse schmelzbar; reine Metalle erhalten für die leichtere Schmelzbarkeit einen Zusatz; Platintiegel durchlöchern an unreinen Stellen. Die Schmelzung der Legirungen beginnt gewöhnlich mit Erweichung, was man durch die Annahme erklärt, daß dieselben in 2 Partieen schmelzen, von denen die eine noch fest sei, während die andere schon den flüssigen Zustand besitze. Indessen gehen auch andere Stoffe, besonders die amorphen Kolloide häufig durch den weichen Zustand in den flüssigen über, dem entsprechend die Schmelzausdehnung mancher Stoffe, wie nach Kopp Wachs und Schwefel, allmälig erfolgt. Krystalloide werden beim Schmelzen gewöhnlich sogleich leichtflüssig und zeigen daher plötzliche Schmelzausdehnung; in dem Moment, wo das Zerfallen der Krystallkeime erreicht ist, sind auch die Moleküle überhaupt von der Anziehung befreit. — Allotrope Modificationen können verschiedene Schmelzpunkte haben, weil ihnen eine verschiedene Molekularlagerung und daher eine verschiedene innere Anziehung entspricht; so ist der Schmelzpunkt des amorphen Phosphors 252°, des gewöhnlichen 43°. Schwefel und Selen haben diese Eigenschaft nicht, weil die amorphen Modificationen derselben bei 100° sich plötzlich in die gewöhnlichen verwandeln.

407

b. **Die Schmelzwärme** (Black 1775) ist die Wärme, welche einem festen Körper, der den Schmelzpunkt erreicht hat, noch zugeführt werden muß, um denselben in Flüssigkeit von derselben Temperatur zu verwandeln. Sie beträgt z. B. für Eis ca. 80°; d. h. um 1^{kg} Eis von 0° in 1^{kg} Wasser von 0° zu verwandeln, sind 80^c nöthig, d. i. so viel Wärme, daß man mit derselben 1^{kg} Wasser um 80° erwärmen könnte. Weil diese Wärme in einen Körper aufgenommen wird, ohne dessen Temperatur zu erhöhen, so nannte man sie zur Zeit der Herrschaft des Wärmestoffes gebundene oder latente Wärme.

Mengt man 1^{kg} fein zerstoßenes Eis von 0° mit 1^{kg} Wasser von 80°, so entstehen 2^{kg} Wasser von 0°; es sind also durch das Schmelzen von 1^{kg} Eis dem 1^{kg} Wasser 80^c entzogen worden. Zuerst genau bestimmt wurde die Schmelzwärme des Eises von de la Prevostaye und Desains (1834), indem dieselben in einer gewogenen Wassermenge m von genau bestimmter Temperatur t ein Stück Eis schmolzen, um das Gewicht M des geschmolzenenen Eises zu finden, und dann ebenso genau die Temperatur T nach der Vollendung des Schmelzens maßen. Ist nun die Schmelzwärme = x, so empfing das Eis die Wärmemenge $M(x + T)$; das Wasser aber verlor die Wärme $m(t - T)$; daraus folgt die Gleichung $M(x + T) = m(t - T)$, wonach x leicht zu finden. Auch Regnault (1844) und Person (1848) fanden nach ähnlichen Methoden und nach Anbringen aller Correcturen dieselbe Zahl 80^c. Person bestimmte auch noch die Schmelzwärme anderer Stoffe: Phosphor 5, Schwefel 9, Natronsalpeter 63, Zinn 14, Wismuth 13, Blei 5, Zink 28, Silber 11, Quecksilber 3^c.

Auch bei jeder anderen Ueberführung eines festen Körpers in den flüssigen Zustand wird Wärme verzehrt, so bei den Lösungen. Wirft man fein gepulvertes Salz in Wasser

und rührt dasselbe mit dem Thermometer um, so bemerkt man bald das Fallen desselben; besonders auffällig wirkt auch hier wieder die Thermosäule. Der Wärmeverbrauch ist um so größer, in je mehr Wasser das Salz gelöst wird, weil die verdünntere Lösung ein weiteres Auseinandergehen der Theilchen, eine größere Disgregationsvermehrung nöthig macht. So ist nach Person (1848) die Lösungswärme von Kochsalz = 11, 13 oder 23°, je nachdem die Wassermenge zu der Salzmenge das Verhältniß 4, 7, 15 hat; bei Natriumsalpeter ist die Lösungswärme 36, 48, 60°, wenn 2, 5, 20mal soviel Wasser als Salz in der Mischung enthalten ist. Indessen nimmt hier die verbrauchte Lösungswärme in viel geringerem Maße zu als die Menge des Lösungsmittels; hieraus folgt, daß die Temperatur-Erniedrigung einer Lösung um so größer wird, je gesättigter dieselbe ist. Diese auch der Theorie entsprechende Folgerung wurde durch Versuche Rüdorffs (1869) bestätigt. Derselbe mischte Wasser mit einer etwas größeren Menge fein gepulverter Salze, als zur Sättigung nöthig war, damit dieselbe möglichst rasch stattfinde, und fand dann die Temperatur-Erniedrigung für Kochsalz 2,5, Chlorkalium 12,6, Salmiak 18,4, für Jodkalium 22,5, für Chlorcalcium (kryst.) 23,2, für Ammoniumnitrat 27,2, für Rhodankalium 34,5. — Die starke Temperatur-Erniedrigung solcher Lösungen wird verwendet zu Kältemischungen. Ein Gemisch von 3 Salmiak und 10 Wasser geht von 13° auf — 5°, ein Gemisch von 3 Rhodankalium mit 2 Wasser von 11 auf — 23° herab. Rührt man diese Mischung mit einem Reagensglas um, das halb mit Wasser gefüllt ist, so ist dieses nach 2 bis 3 Minuten in Eis verwandelt. Noch bedeutender wird in manchen Fällen die Abkühlung, wenn man statt Wasser Schnee oder gestoßenes Eis nimmt. Es bildet sich dann durch die Wirkung der bewegten Moleküle auf einander eine Verbindung der beiden Stoffe, die der Lösung entspricht; da nun diese Lösungen einen viel niedrigeren Schmelzpunkt (s. 408.) als die Bestandtheile haben, so muß die feste Mischung flüssig werden; es wird deßhalb nicht blos Lösungswärme des Salzes, sondern auch Schmelzwärme des Wassers verzehrt und dadurch die Temperatur viel mehr erniedrigt als bei Anwendung von Wasser. So erzeugt eine Mischung von 3 Schnee und 1 Kochsalz eine Kälte von — 21° (Fahrenheit erhielt — 17,7° und verlegte dahin seinen Nullpunkt), 3 kryst. Chlorcalcium und 1 Schnee eine Kälte von — 33°. — Die Erniedrigung geht hierbei, wenn man das Mischungsverhältniß der gesättigten Lösung nimmt, oft bis zum Gefrierpunkte der gesättigten Lösung herab, aber nicht tiefer, weil sonst durch das Gefrieren wieder Wärme erzeugt würde (s. 408.). Wird ein anderes Mischungsverhältniß angewendet, so ist die Abkühlung nicht so stark, weil weniger concentrirte Lösungen einen höheren Gefrierpunkt haben (s. 408.).

408 2. **Die Erstarrung.** Das Festwerden flüssiger Stoffe ist in jeder Beziehung die Umkehrung der Erscheinungen des Schmelzens. Damit eine Flüssigkeit erstarre, muß sie auf eine gewisse Temperatur abgekühlt werden; die Temperatur, die ein Thermometer in einer erstarrenden Flüssigkeit zeigt, heißt der Erstarrungspunkt oder Gefrierpunkt. Der Erstarrungspunkt ist mit dem Schmelzpunkte identisch. Wenn eine Flüssigkeit erstarrt, so wird durch die hierbei stattfindende Disgregationsverminderung ebenso viel Wärme erzeugt, als bei dem Schmelzen verbraucht wird. Die producirte Erstarrungswärme ist gleich der consumirten Schmelzwärme; früher sagte man, die latente Wärme wird beim Erstarren wieder frei. Der Erstarrungspunkt der meisten Flüssigkeiten wird durch Druck erhöht, der des Wassers erniedrigt, wobei für jeden Grad die latente Wärme um 0,81° abnimmt. Das Erstarren kann verzögert, d. h. eine Flüssigkeit kann unter ihren Gefrierpunkt abgekühlt oder überkaltet werden, ohne zu erstarren, wenn man sie vor jeder Erschütterung und Berührung mit festen Körpern abschließt, oder wenn sie im Gegentheile zu heftigster Bewegung durch einander gerüttelt wird, oder wenn man sie in capillardünnen Röhren einschließt, oder wenn man Stoffe in derselben löst. Lösungen haben also, wie Mischungen überhaupt, einen erniedrigten Erstarrungspunkt, und zwar um so niedriger, je gesättigter sie sind.

Wenn man eine Flüssigkeit künstlich unter den Gefrierpunkt abkühlt oder überkalten und sie dann erstarren läßt, so steigt die Temperatur bis zum Gefrierpunkte, und ein Theil der Flüssigkeit erstarrt nicht, weil derselbe durch die Erstarrungswärme des festgewordenen Theiles flüssig erhalten bleibt. Läßt man z. B. luftfreies Wasser, geschützt vor Erschütterung und Luftzug, bis auf — 10° überkalten, und erschüttert es dann, so gefriert $^1/_8$ der Masse und das Ganze erhebt sich zu 0°. Da $^7/_8$kg hierbei eine Erhöhung von 10° erfahren, so muß das erstarrte $^1/_8$ beim Gefrieren $^{80}/_8$c erzeugt haben, wodurch sich die Erstarrungswärme des Wassers = 80c, gleich der Schmelzwärme, herausstellt. — Die Erstarrungs-

wärme des Wassers ist die Ursache des langsamen Gefrierens der Flüsse, Seen und Meere; durch das Erstarren eines Theiles des Wassers entsteht soviel Wärme, daß der übrige Theil flüssig bleibt und unter der schlecht leitenden Eisdecke seine Wärme nur sehr langsam verliert. Ebenso ist die Schmelzwärme die Ursache des langsamen Aufthauens der Eismassen; das Schmelzen eines Theiles derselben verzehrt sämmtliche vorhandene Wärme, so daß zum Schmelzen des übrigen Theiles erst neue Wärme herbeigeführt werden muß. — Die Erstarrungswärme ist die Ursache mancher Wärmeentwickelung bei chemischen Vereinigungen, z. B. beim Löschen des Kalkes. Auch beim Krystallisiren entsteht Wärme. Kocht man z. B. eine Lösung von 2 Theilen Glaubersalz in 1 Theil Wasser stark auf, verschließt dann schnell das Kölbchen und läßt die Lösung ruhig abkühlen, so entsteht beim Eintauchen eines Thermometers Krystallisation und starke Temperaturerhöhung. Schmilzt man in einem Kölbchen Natriumhyposulfit durch Erwärmen auf 45° und läßt die Masse dann langsam und ruhig bis zur gewöhnlichen Temperatur erkalten, so zeigt sich beim Einwerfen eines Stückchens festen Salzes plötzliche Krystallisation und eine Temperatursteigerung um 20°.

Das Ueberkalten oder Ueberschmelzen, d. i. die Abkühlung von Flüssigkeiten unter ihren Gefrierpunkt ohne Erstarrung (Wasser auf — 12°, Phosphor auf 24°, Schwefel auf 20°) ist noch nicht ausreichend erklärt. Manche meinen, es möge wohl auch von der Erstarrungswärme herrühren; an allen Stellen der Flüssigkeit möchten sich wohl sehr kleine feste Theilchen bilden, deren Erstarrungswärme wegen der geringen Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit nicht aus derselben hinaus gelangen könne und daher die übrigen Theilchen flüssig erhalte. Andere erklären die Ueberkaltung durch den labilen Gleichgewichtzustand, den die Flüssigkeiten innerlich bilden, und den sie nur durch einen Anstoß verlassen. Diese Erklärungen würden keineswegs für die Ueberkaltung durch heftigste Bewegung ausreichen; für Krystalloide folgt dieselbe aber einfach daraus, daß durch die Bewegung die Bildung von Krystallkeimen verhindert wird; dieselbe Wirkung hat die Adhäsion in Capillarröhren, in welchen Wasser schon bis auf — 20° ohne zu erstarren abgekühlt wurde.

Wie feste Mischungen einen niedrigeren Schmelzpunkt, so haben flüssige Mischungen einen niedrigeren Erstarrungspunkt. Lösungen in Wasser gefrieren erst unter 0° und zwar um so tiefer unter 0°, je concentrirter sie sind. Nach Rüdorff (1861) ist die Erniedrigung dem Procentgehalte der Lösung proportional; mit 2% Kochsalz gefriert Wasser bei — 1,2°, mit 12% bei — 7,2°; doch muß bei diesem Gehalte das Krystallwasser mancher Salze mitgerechnet werden, woraus man schloß, daß manche Salze sich als wasserhaltige Salze lösen. Beim Erstarren von Salzlösungen gefriert reines Wasser als salzfreies Eis heraus; man macht deßhalb das Meerwasser durch Gefrierenlassen in abgeschlossenen Räumen concentrirter, um es dann zur Salzbereitung zu benutzen. Wenn eine gefrorene Salzlösung noch Salz enthält, so findet sich dasselbe als flüssige concentrirte Schicht zwischen salzfreien Eisblättern. — Der Gefrierpunkt des Meerwassers liegt bei — 2,2°; doch kann dasselbe selbst bei gewöhnlicher Bewegung tief überkaltet werden, und erstarrt dann erst bei heftigster Bewegung oder bei Berührung mit festen Körpern, besonders mit Eis- oder Schneekörnern, und dies mit solcher Raschheit, daß sich oft plötzlich das kurz vorher ganz eisfreie Meer in Eis verwandelt, aber wegen der Erstarrungswärme und wegen der übrig bleibenden concentrirten Lösung nur in einen Eisbrei. Sehr bedeutend ist im Meere auch die Bildung von Grundeis, weil das Meerwasser, abweichend vom reinen Wasser, seine größte Dichte erst etwa bei — 5° hat und daher durch und durch überkalten kann. In den nördlichen Meeren sieht man deßhalb an flachen Stellen den Boden ganz mit Eis bedeckt; doch ist die Grundeisbildung bis in 200′ Tiefe nachgewiesen. Ist im Winter allmälig das Meer bis auf den Grund überkaltet, so entstehen durch Berührung mit dem Boden oder an heftiger bewegten Schichten kleine Eiskrystalle, die sich dann erheben, während ihres Steigens das Wasser ringsum in Eis verwandeln und sich dadurch ringsum vergrößern, so daß sie als runde Fladen von 1—2′ Durchmesser auf der Oberfläche anlangen (Pfannkucheneis). Auch diese Eiskuchenbildung geschieht oft plötzlich auf weite Strecken, erzeugt aber ebenfalls keine festen Massen, sondern nur einen dichten Eisbrei (Edlund 1863). — Nach Rudberg haben manche Legirungen zwei Erstarrungspunkte, einen höheren mit der Zusammensetzung veränderlichen, und einen niedrigeren constanten; nach Schultz (1869) gehört der letztere einem bestimmten Mischungsverhältnisse, der erstere dem überschüssigen Metall an. Aehnlich verhalten sich solche Flüssigkeiten, die nur in begrenzten Verhältnissen mischbar sind. Nach Schultz wirkt auch eine Beimischung von Gasen erniedrigend auf den Gefrierpunkt und zwar um so stärker, je mehr Gas gelöst ist. Luftfreies Wasser in einem Kölbchen gefriert, wenn man dasselbe in schmelzendes, lufthaltiges Eis taucht.

Die Regelation des Eises (Faraday 1850). Wenn zwei Eisstücke von 0° mit den schmelzenden Oberflächen dicht an einander gebracht werden, so frieren diese 409

Oberflächen zusammen; dieser Erscheinung gab Faraday den Namen Regelation. Dieselbe tritt ein, wenn sich die Flächen nur berühren, wie auch wenn sie durch schwachen oder starken Druck zusammengepreßt werden; im letzteren Falle ist das Zusammenfrieren rascher und fester als im ersteren. Sie geschieht nicht blos bei niedriger Temperatur der Luft, sondern auch bei hoher, sogar im heißen Wasser. Vermöge der Regelation besitzt Eis durch Druck Plasticität, nicht aber durch Zug; preßt man Eis durch 2 Holzstücke zusammen, welche zwei gleichmäßig flache Höhlungen tragen, so erhält man eine durchsichtige Eislinse; läßt man eine gerade Eisstange durch eine Reihe allmälig stärker gekrümmter Formen unter Anwendung von Druck gehen, so kann man sie allmälig in einen Halbring umwandeln.

Schwimmt auf Wasser eine Anzahl von Eisstücken, die sich einander berühren, so kann man mit dem ersten alle anderen fortziehen, selbst wenn sie nur in Punkten an einander stoßen. Tyndall ging an einem heißen Sommertage in einen Eisladen und hob mit dem obersten Stücke eine ganze Schüssel voll Eis in die Höhe. Die Regelation geschieht aber nicht, wenn das Eis nicht im Schmelzen begriffen ist, wenn es kälter ist als 0°. Sehr kalter Schnee ballt sich nicht, weil bei dieser Temperatur die Oberfläche der kleinen Eistheilchen, aus denen der Schnee besteht, nicht mit Wasser bedeckt ist, und weil daher auch das Zusammenfrieren nicht stattfinden kann; dagegen ballt sich der Schnee gut, wenn er dem Aufthauen nahe ist, weil dann die kleinen Eistheilchen mittels ihres Oberflächenwassers zusammenfrieren. Ist das Schmelzen weiter vorangeschritten, so erhält man durch Zusammendrücken in der Hand einen Eisballen. Bringt man Schnee oder Eisstücke in eine Presse, so kann man vollkommen zusammenhängende, fast durchsichtige Eisblöcke daraus formen, die aus hohen Cylindern zu flachen und umgekehrt wieder zu hohen durch Druck umgebildet werden können. Ganz in derselben Weise wird der Firnschnee der Alpenspitzen zu Gletschereis, das vermöge der Plasticität, die es der Regelation verdankt, die Thäler mit all ihren Windungen, Verengungen und Erweiterungen erfüllt, ja sogar über steile Stellen zusammenhängend, wenn auch geborsten, hinübergeht, und, wenn es einen Sturz, einem Wasserfalle ähnlich erleidet, doch gleich unterhalb dieser Stelle wieder ein Ganzes bildet, wie der Fluß unterhalb seines Falles (Gletschercascaden).

Ueber die Erklärung der Regelation besteht noch keine Einigkeit. Faraday hielt sie für eine Contactwirkung des Eises, die in ähnlicher Weise stattfinde, wie ein sich zersetzender Stoff seinen Zustand auf einen sehr nahen Stoff übertrage. Tyndall erklärt diese Contactwirkung dadurch, daß mit der Berührung zweier Eisflächen das Flächenwasser ins Innere des Eises eingeschlossen und dadurch die freie Beweglichkeit der flüssigen Moleküle gehemmt werde. Schultz (1869) glaubt, das innere Wasser gefriere wegen Luftarmuth eher als äußeres lufthaltiges Wasser. Helmholtz (1865) warf gegen solche Erklärungen die theoretische Schwierigkeit ein, daß durch das Gefrieren eine beträchtliche Quantität latenter Wärme frei werde, deren Verschwinden durch jene Erklärungen unklar bleibe. Nun zeigte Pfaundler (1869), daß bei der Berührung von Wasser und Eis sich zwar das Eisgewicht nicht ändern könne, weil die Summe der lebendigen Kräfte von Wasser- und Eiswärme dieselbe bleiben müsse, wohl aber die Gestalt des Eises. Die fortschreitend bewegten Wassermoleküle, die an das Eis schlagen, können nämlich unverändert zurückgeworfen, können aber auch von den Eismolekülen festgehalten werden, oder ihre Bewegung den Eismolekülen mittheilen und dieselben dadurch dem flüssigen Zustande nahe bringen. Das Eis bietet nämlich dem Wasser wegen seines krystallinischen Zustandes Moleküle der verschiedensten Beschaffenheit dar, Moleküle, welche mit mittlerer, solche, welche mit großer, und solche, welche mit kleiner Kraft in ihrer Gleichgewichtslage verharren; diese drei verschiedenen Zustände müssen auf die Wassermoleküle die drei genannten Wirkungen ausüben, es wird daher das Eis an einer Stelle unverändert bleiben, an anderen zu-, an anderen abnehmen. Daher können sich zwischen Eisflächen dünne, vereinigende Eisbrücken bilden. Pfaundler zeigte dies an einer in einem Glaskolben schwimmenden Eiskugel von nahezu gleicher Größe, welche, in schmelzenden Schnee getaucht, innen durch kugelkreisförmige Eisbrücken an das Glas anfror. Hiermit ist die Regelation ohne Druck dargethan. Durch erhöhten Druck, so geben alle Forscher zu, wird die Regelation bedeutend beschleunigt und vermehrt nach der Thomson-Helmholtz'schen Erklärung: Durch den Druck wird der Schmelzpunkt erniedrigt; schmelzendes Eis wird daher durch Druck kälter und bringt so das umliegende Wasser zum Gefrieren. Dieser Druckkälte des Eises ist offenbar die rasche Regelation zusammengepreßter Eisstücke, wie auch die Regelation der Gletscher zuzuschreiben; Helmholtz hielt aber auch das Zusammenfrieren von blos genäherten Eisstücken für eine Folge capillaren Druckes, welche Annahme nach Pfaundlers Erklärung nicht mehr nöthig erscheint.

410 **8. Die Verdampfung** (Clausius 1857). Die Verdampfung eines Körpers findet sowohl an der Oberfläche als im Inneren desselben statt: das Verdampfen an der Oberfläche nennt man Verdunsten, das Verdampfen im Inneren Sieden oder Kochen. Das Verdunsten geschieht bei jeder Temperatur; das Sieden aber erst bei einer bestimmten Temperatur, welche hauptsächlich von der Natur der Flüssigkeit und dem Drucke auf dieselbe abhängt, und welche man Siedepunkt nennt. Außer der Erwärmung bis zum Siedepunkte ist zum Sieden, sowie auch zum Verdunsten, noch eine gewisse Wärmemenge nöthig, welche zur Verdampfung verbraucht wird, und welche wir Dampfwärme nennen wollen.

Damit ein Körper luftförmig werde, muß die lebendige Kraft der Moleküle so vergrößert werden, daß dieselben ganz aus dem Wirkungskreise der Anziehung der übrigen Moleküle heraustreten. Zu diesem Zwecke müssen die Moleküle weit von einander entfernt werden; es ist daher die Anziehung auf einem großen Wege zu überwinden. Wenn dieselbe nun auch im flüssigen Zustande nahezu gleich Null ist und während der Verdampfung immer noch kleiner wird, so ist doch die Arbeit zur Ueberwindung der Anziehung beträchtlich, weil der Weg groß ist, auf dem diese Ueberwindung geschehen muß. Außerdem ist gewöhnlich bei der Verdampfung ein äußerer Druck, meistens der Luftdruck, zurück zu schieben, und zwar wegen der bedeutenden Volumvergrößerung bei der Verdampfung auf einem ebenfalls großen Wege. Es sind also bei der Verdampfung zwei beträchtliche Arbeiten zu leisten, eine innere Arbeit, die Disgregationsvermehrung, und eine äußere Arbeit, die Zurückschiebung des äußeren Druckes. Diese Arbeiten müssen von zugeführter Wärme geleistet werden; folglich wird bei der Verdampfung Wärme verzehrt, die Dampfwärme. Es kann zwar auch der Fall eintreten, daß keine äußere Arbeit zu leisten ist; aber ein Verbrauch von Dampfwärme findet immer statt, mag die Verdampfung bei hoher oder niedriger Temperatur, bei Luftdruck oder Luftleere, im Inneren oder an der Oberfläche geschehen. Hierin stimmt das Verdampfen mit dem Schmelzen überein; ein Unterschied zwischen beiden Vorgängen liegt aber darin, daß zur Verdampfung nicht immer eine Temperaturerhöhung der Flüssigkeit nöthig ist, wie zur Schmelzung eines festen Körpers; denn im flüssigen Zustande ist die Anziehung der Moleküle schon nahe gleich Null, kann also schon bei einer geringen Erhöhung der lebendigen Kraft der Moleküle überwunden werden, und wird überwunden, wenn die nöthige Arbeit, die Dampfwärme zu Gebote steht. Diese Erhöhung der lebendigen Kraft eines Moleküls kann z. B. an der Oberfläche durch einen Stoß der Nachbarmoleküle hervorgebracht werden, wodurch das Molekül aus der Wirkungssphäre der Anziehung heraus geschleudert und dadurch ein freies Gasmolekül wird; an der Oberfläche verdampfen daher die Flüssigkeiten bei jeder Temperatur. Im Inneren einer Flüssigkeit ist dieses Fortschleudern eines Moleküls nur möglich, wenn sich Luftbläschen, lufterfüllte Hohlräume, wenn auch von unmerklicher Kleinheit in derselben finden; zwischen die Luftmoleküle eines solchen Bläschens können dann die Dampfmoleküle der Flüssigkeit einströmen. Durch ihre lebendige Kraft üben dieselben auf die Grenzfläche des Bläschens einen Druck aus, sie geben dem Dampfe eine gewisse Spannung. Ist diese Spannung, dieser Druck gegen die Haut der Bläschen groß genug, den auf den Bläschen lastenden Druck der äußeren Luft und der Flüssigkeit zurückzuschieben, so wird sich das Bläschen zu einer Dampfblase vergrößern, die Flüssigkeit wird sieden. Zum Sieden ist also nöthig, daß die Spannung des im Inneren der Flüssigkeit entstehenden Dampfes dem äußeren Drucke gleich sei. Diese Spannung wächst aber offenbar mit der Temperatur der Flüssigkeit und des Dampfes; denn je höher die Temperatur der Flüssigkeit ist, um so größer ist die lebendige Kraft ihrer Theilchen, um so leichter wird also die Geschwindigkeit eines Moleküls bis zur Freiheit von der Anziehung erhöht, um so zahlreicher sind daher die entstehenden Dampftheilchen; und je höher die Temperatur des Dampfes ist, um so größer ist die Geschwindigkeit, also auch die lebendige Kraft der Dampftheilchen. Durch erhöhte Temperatur wird also sowohl die Zahl, wie die lebendige Kraft der Dampfmoleküle vermehrt; folglich wächst die Dampfspannung mit der Temperatur. Ist nun kein oder nur ein geringer Luftdruck vorhanden, so haben die in die Luftbläschen einströmenden Dampftheilchen, um dieselben zu Dampfblasen zu erweitern, nur das kleine Gewicht der über den Bläschen ruhenden Flüssigkeitsäulchen zu überwinden, wozu sie nur einer geringen lebendigen Kraft, einer niedrigen Temperatur bedürfen; unter gänzlicher Luftleere oder unter niedrigem Luftdrucke geschieht die Dampfbildung im Inneren oder das Sieden schon bei sehr niederen Temperaturen. Bei gewöhnlichem Luftdrucke aber oder bei noch höherem Dampfdrucke ist das Sieden erst möglich, wenn durch erhöhte Temperatur die Spannung des Dampfes im Inneren der Bläschen vergrößert und dem äußeren Drucke wenigstens gleich gemacht wird; dann können die Bläschen sich zu

Dampfblasen vergrößern, die durch Auftrieb in die Höhe steigen und so das für das Kochen characteristische Aufwallen der Flüssigkeit veranlassen. — Nach dieser Theorie des Siedens tritt dasselbe nur in einer bläschenhaltigen Flüssigkeit bei der Temperatur ein, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleichkommt; fehlen diese Bläschen, so kann das Sieden nur stattfinden, wenn durch die gesteigerte Molekularbewegung eine Partie der Flüssigkeitstheilchen aus einander geht und dadurch ein Bläschen bildet, wozu eine höhere Temperatur erforderlich ist.

411 **Der gesättigte Dampf.** Jeder Raum kann bei einer bestimmten Temperatur nicht mehr als eine bestimmte Dampfmenge aufnehmen, die neben der Größe des Raumes und der Natur der Flüssigkeit nur von der Temperatur abhängt und mit dieser zunimmt. Enthält der Raum soviel Dampf, als er bei der betreffenden Temperatur aufnehmen kann, so nennt man ihn mit Dampf gesättigt, und der Dampf selbst wird gesättigter oder saturirter Dampf genannt; enthält ein Raum nicht soviel Dampf, als er bei seiner Temperatur aufnehmen könnte, so wird der Dampf ungesättigter oder überhitzter Dampf genannt. Gibt man einem Flüssigkeit enthaltenden Raume eine bestimmte Temperatur, so befindet sich anfänglich über der Flüssigkeit überhitzter Dampf, dessen Dichtigkeit und Spannung allmälig zunehmen, bis endlich der Raum mit Dampf gesättigt ist, wodurch dessen Spannung und Dichte den höchsten Grad erreicht haben, der bei jener Temperatur möglich ist; man sagt, der gesättigte Dampf hat das Maximum der Spannung. Indessen ist gesättigter Dampf ebenso wohl als überhitzter außer Berührung mit seiner Flüssigkeit denkbar; es ist für den gesättigten Dampf nur die Voraussetzung nöthig, daß er seit seiner Trennung von der Flüssigkeit keiner Temperaturerhöhung ausgesetzt war, da er hierdurch in überhitzten Dampf verwandelt worden wäre. — Der gesättigte, wie der überhitzte Dampf erscheinen äußerlich häufig den meisten Gasen gleich, nämlich farblos und durchsichtig und daher unsichtbar; doch ist der gesättigte Dampf in seinen inneren Eigenschaften sehr von den Gasen verschieden. Wird gesättigter Dampf, getrennt oder berührt von seiner Flüssigkeit, bei gleichbleibender Temperatur zusammengedrückt, so erhöht er nicht, wie es die Gase thun, seine Dichte und seine Spannung, sondern beide behalten dieselbe Größe, während ein Theil des Dampfes zu Flüssigkeit condensirt wird, da der kleinere Raum nicht dieselbe Dampfmenge fassen kann; auch hier tritt wieder die Eigenschaft hervor, daß der gesättigte Dampf das Maximum der Spannung besitzt. Wird gesättigter Dampf, der noch mit Flüssigkeit in Verbindung steht, ohne Temperaturänderung ausgedehnt, ohne eine Arbeit zu vollbringen, so vermindern sich Spannung und Dichte nicht wie bei den Gasen, sondern sie behalten denselben Werth, indem ein Theil der Flüssigkeit in Dampf übergeht. Wenn man die Temperatur von gesättigtem, Flüssigkeit berührendem Dampfe erhöht, so steigert sich seine Spannung nicht wie bei den Gasen nach dem Mariotte-Gaylussac'schen Gesetze für jeden Grad um $1/273$, sondern um einen größeren Betrag; denn es entwickelt sich noch neuer Dampf, dessen Spannung sich zu der erhöhten des früher vorhandenen Dampfes summirt. Umgekehrt, wird gesättigter Dampf abgekühlt, so wird seine Spannung stärker als um $1/273$ vermindert, indem mit der Abkühlung eine Condensation verbunden ist. Wenn gesättigter Dampf durch seine Ausdehnung Arbeit leistet, so wird ebenfalls ein Theil desselben als Flüssigkeit niedergeschlagen, weil zur Leistung der Arbeit ein Wärmeverbrauch nöthig ist, durch einen solchen aber Dampf condensirt wird (Clausius und Rankine 1860).

Die Eigenschaften des gesättigten Dampfes sind eine Folge der molekularen Bewegungen der Flüssigkeit und des Dampfes. Die in einen Dampfraum von der Flüssigkeit abströmenden Moleküle werden von den Grenzen des Raumes oder von anderen Molekülen zurückgeworfen und gelangen so wieder an die Oberfläche der Flüssigkeit oder an die condensirte Flüssigkeitschicht einer anderen Grenzwand, wo sie theilweise durch die Anziehung der Moleküle festgehalten und dadurch wieder mit der Flüssigkeit vereinigt werden: offenbar können auch zusammenstoßende Moleküle, da ihre fortschreitende Bewegung noch nicht

schnell genug geschieht, sich einander festhalten, wodurch innerhalb des Dampfes Molekülgruppen entstehen, die dem flüssigen Zustande nahe sind; solche Molekülgruppen können auch durch das Aufwallen des Dampfes aus der Flüssigkeit mitgerissen werden; sie sind wie die Flüssigkeit im Verdampfen begriffen. So lange von der Flüssigkeit und den Molekülgruppen mehr Moleküle fortfliegen als zurückkehren, ist der Dampf nicht gesättigt; dies ist um so länger der Fall, je höher die Temperatur ist, weil dann die Menge der abströmenden Moleküle größer ist. Kehren ebenso viele Moleküle zur Flüssigkeit und zu den Gruppen zurück, als in derselben Zeit abströmen, so ist der Dampf gesättigt; in diesem Zustande kann sich die Zahl der Molekülgruppen nicht mehr vermindern; der gesättigte Dampf enthält also am meisten Molekülgruppen. — Wird der gesättigte Dampfraum verkleinert, so vermehrt sich die Zahl der zurückkehrenden Moleküle, die der entstehenden bleibt ungeändert, folglich wird Dampf an der Flüssigkeit und an den Gruppen condensirt. Wird der Dampfraum vergrößert, so schreiten die nach der zurückweichenden Grenzwand gerichteten Moleküle weiter fort, statt zurückzukehren; während also das Abströmen der Dampfmoleküle von der Flüssigkeit fortdauert, kehren weniger Moleküle zu derselben zurück; es findet demnach erneuerte Verdampfung statt. Leisten aber die voranströmenden Moleküle hierbei eine Arbeit, so verlieren sie einen Theil ihrer Geschwindigkeit, wodurch ihre Vereinigung zu Flüssigkeit befördert und so Condensation bewirkt wird.

Der Nachweis ist leicht mit Torricelli'schen Röhren zu führen, die man nahezu mit Quecksilber füllt, dann mit Aether, Alkohol, Wasser vollgießt und auf die bekannte Weise umkehrt und in hohe Quecksilbergefäße taucht. Die Flüssigkeiten erscheinen dann auf dem Quecksilber und verdampfen in der Torricelli'schen Leere. Das Quecksilber fängt sogleich an zu fallen, während die Flüssigkeit sich vermindert; bald aber bleibt das Quecksilber fest und bestimmt an gewissen Stellen stehen, obwohl noch Flüssigkeit übrig ist: die Räume sind jetzt dampfgesättigt. Beim Aether steht das Quecksilber am tiefsten, beim Wasser am höchsten, woraus ersichtlich, daß bei gleicher Temperatur der Aether stärker als Alkohol und dieser stärker als Wasser verdampft. Schiebt man die Röhren tiefer in das Quecksilbergefäß, so verkleinert sich der Dampfraum, die Flüssigkeit vermehrt sich, aber die Quecksilbersäule behält ihre Höhe; es findet Condensation ohne Spannungsverminderung statt. Zieht man die Röhren weiter heraus, so vergrößert sich der Dampfraum, die Flüssigkeit vermindert sich; aber auch jetzt bleibt die Höhe der Quecksilbersäule ungeändert, so lange noch Flüssigkeit vorhanden ist; es findet also Dampfvermehrung ohne Aenderung der Spannung statt. Wenn man dagegen durch einen heißen, über die Röhre geschobenen Metallring die Temperatur erhöht, so vermindert sich die Flüssigkeit und die Quecksilbersäule fällt; dies zeigt Dampfvermehrung und Erhöhung der Spannung an. Die umgekehrte Erscheinung tritt bei Abkühlung durch einen kalten Metallring ein.

412 **Der ungesättigte oder überhitzte Dampf** entsteht, wenn ein sehr großer Raum nur eine geringe Menge Flüssigkeit enthält, oder wenn der gesättigte Dampf abgeschlossen von seiner Flüssigkeit bei gleichbleibender Temperatur ausgedehnt oder bei gleichbleibendem Volumen höher erwärmt wird; die letztere Entstehungsweise erklärt den Namen des überhitzten Dampfes. Ueberhitzter Dampf wird gesättigt, wenn man ihn bei constanter Temperatur comprimirt oder bei constantem Volumen abkühlt oder wenn man Flüssigkeit in den Dampfraum bringt. Vergleicht man überhitzten mit gesättigtem Dampfe, so ergibt sich, daß bei gleicher Temperatur der gesättigte Dampf eine höhere Spannung und größere Dichtigkeit hat als der überhitzte, und daß umgekehrt bei gleicher Spannung der überhitzte Dampf eine höhere Temperatur besitzen muß als der gesättigte, wodurch ebenfalls die Benennung überhitzt gerechtfertigt erscheint. Ist die Ueberhitzung des Dampfes gering, so steht derselbe in seinen Eigenschaften noch dem gesättigten Dampfe nahe; ist aber die Ueberhitzung groß, entfernt sich also der Dampf weit von seinem Condensationspunkte, so nähert sich sein Verhalten immer mehr dem eines eigentlichen Gases. Endlich wird eine Grenze erreicht, jenseits welcher der Dampf die Gesetze von Mariotte und Gay-Lussac wie ein Gas befolgt, während er in dem Uebergangszustande von der Sättigung bis zu dieser Grenze von jenen Gesetzen abweicht und zwar um so stärker, je näher er der Sättigung kommt. Wo diese Grenze liegt, wie weit sich also der Uebergangszustand erstreckt, ist noch nicht erforscht.

In dem Uebergangszustande enthält der überhitzte Dampf noch Molekülgruppen, an denen Condensation und Verdampfung vor sich geht wie an Flüssigkeit; hierdurch erklärt sich

die Annäherung des wenig überhitzten an den gesättigten Dampf. Die Zahl dieser Molekülgruppen wird um so geringer, je höher die Ueberhitzung steigt; sind alle Molekülgruppen in Dampfmoleküle gespalten, so ist der Grenzzustand erreicht, der Dampf ist ein Gas geworden. Nachweise können wie bei dem gesättigten Dampfe mit Torricelli'schen Röhren geführt werden, in deren Leere man nur Spuren von Flüssigkeit bringt.

413 **Die Spannung des gesättigten Dampfes** ist der Druck, den der Dampf vermöge seiner Ausdehnsamkeit, d. i. vermöge der lebendigen Kraft seiner Moleküle auf seine Umgebung, sowie in sich selbst ausübt. Dieselbe ist unabhängig von der Größe des Raumes, aber abhängig von der Natur der Flüssigkeit und der Temperatur. Ueber den Zusammenhang mit der Temperatur ergeben sich für die Spannung folgende zwei Wahrheiten: 1. Die Spannung des gesättigten Dampfes ist in dem Siedepunkte gleich dem äußeren Drucke. Denn die Bläschen im Inneren einer Flüssigkeit können sich nur dann zu Dampfblasen erweitern, wenn die Spannung des einströmenden Dampfes den auf ihnen lastenden äußeren Druck überwinden kann, wenn also die Spannung dem äußeren Drucke gleich ist. Für Flüssigkeiten, die unter dem Luftdrucke stehen, wie z. B. Flüssigkeiten in offenen Gefäßen, ist die Spannung des gesättigten Dampfes im Siedepunkte gleich dem Luftdrucke.

2. Die Spannung des gesättigten Dampfes wächst mit der Temperatur. Für Wasserdampf ist sie z. B. bei 100° C. = 1^{at}, bei 120° = 2^{at}, bei 135° = 3^{at}, bei 145° = 4^{at}, bei 200° = 16^{at}, bei 220° = 23^{at}, dagegen bei 82° = $\frac{1}{2}^{at}$ = 380mm Quecksilber, bei 50° = 92mm, bei 4° = 6mm, bei 0° = 4,5mm; bei — 10° = 1mm, bei — 31° = 0,3mm. — Hieraus ist schon zu erkennen, daß ein einfaches Gesetz für den Zusammmenhang der Größe der Spannung mit der Temperatur nicht besteht; noch genauer geht dies aus den zahlreichen Forschungen hervor, die seit Jahrhunderten zum Zwecke der Auffindung eines solchen Gesetzes gemacht wurden und in den eingehenden und genauen Untersuchungen von Regnault und Magnus (1843) ihren Höhepunkt fanden; diese Forscher stellten wohl für den Wasserdampf Formeln auf, die sehr genau den Versuchsresultaten genügen, aber wegen ihrer Verwickeltheit und Unableitbarkeit nicht den Character eines Gesetzes tragen. So gibt Magnus die Formel

$$S = 4{,}525 \,.\, 10^{\frac{7{,}4475\,t}{234{,}69 + t}}$$

worin S die Spannung und t die Temperatur bedeutet; noch verwickelter sind die Formeln von Regnault, welche außerdem noch für verschiedene Temperaturintervalle verschieden sind. Doch existirt auch eine Formel von Regnault, welche dazu dienen kann, die ganze Reihe der Spannungen wiederzugeben; sie lautet:

$$\log S = a - b \,.\, \alpha^x - c \,.\, \beta^x$$

worin $x = t + 20$, $\log \alpha = 0{,}994\,049\,292 - 1$, $\log \beta = 0{,}988\,343\,882 - 1$, $\log b = 0{,}1\,397\,743$, $\log c = 0{,}6\,924\,351$, $a = 6{,}2\,640\,348$.

Ebenso wenig wie durch Induction, ist es durch Deduction gelungen, das Gesetz für die Abhängigkeit der Spannung von der Temperatur zu finden, obgleich leicht einzusehen ist, daß die Spannung mit der Temperatur zunehmen muß; denn durch die Erhöhung der Temperatur nimmt nach Gay-Lussacs Gesetz die Spannung jedes Gases zu, und außerdem vermehrt sich die Dampfentwickelung, so daß bei höherer Temperatur mehr Dampfmoleküle mit größerer lebendiger Kraft einwirken. Auch für verschiedene Dämpfe besteht kein einfacher Zusammenhang; nur die Folgerung liegt sehr nahe, daß die Spannung eines Dampfes durchschnittlich um so größer ist je niedriger sein Siedepunkt liegt, da beim Siedepunkte die Spannung aller Dämpfe dieselbe, nämlich gleich dem Luftdrucke ist. So ist bei 120° die Spannung von Aetherdampf = 10^{at}, von Schwefelkohlenstoff = 7^{at}, von Alkoholdampf =

5at, von Chloroformdampf = 4at, von Wasserdampf = 2at; Quecksilberdampf hat erst bei 375° 1at und bei 400° 2at Spannung. — Dalton hatte sogar aus seinen Versuchen das Gesetz gefolgert, daß die Spannungen der Dämpfe in gleichen Abständen von den Siedepunkten einander gleich seien, was sich im Allgemeinen als unrichtig, für einzelne Flüssigkeitsgruppen aber als giltig erwiesen hat. — Die Spannung der Dämpfe von Salzlösungen ist geringer als die Spannung der Dämpfe des Lösungsmittels bei derselben Temperatur in reinem Zustande; die Verminderung ist verschieden für verschiedene Salze; für jedes einzelne Salz ist sie der gelösten Salzmenge proportional; außerdem wächst die Verminderung mit der Temperatur (Wüllner 1860). Die Spannung der Dämpfe von Flüssigkeitsgemischen ist nicht, wie man früher glaubte, gleich der Summe der Spannungen der Dämpfe der Bestandtheile, sondern im Allgemeinen geringer als diese Summe (Magnus 1836); nach Regnault (1854) erreicht die Spannung bei solchen Gemischen, die wie Wasser und Aether sich nur in einer begrenzten Menge mischen, kaum diejenige des flüchtigeren Gemengtheiles, bleibt aber bei solchen, die sich in allen Verhältnissen mischen, wie Wasser und Weingeist, tiefer unter dieser Spannung zurück (Wüllner 1866), während bei Gemengen, die sich nicht mischen, wie Wasser und Oel, oder Wasser und Schwefelkohlenstoff die Spannung des Dampfgemenges der Summe der Spannungen der Gemengtheile sehr nahe gleich ist. Für die Spannung der Dämpfe in gaserfüllten Räumen gilt das Dalton'sche Gesetz (1801): Die Spannung eines Gemenges aus Luft und Dampf ist gleich der Summe der Spannungen der Luft und des Dampfes, jede bei gleicher Temperatur für sich genommen. Indeß gilt dieses Gesetz nicht unbeschränkt; die Spannung des Dampfes ist vielmehr im Vacuum um einen sehr kleinen Betrag größer als in Gasen; die Abweichung ist um so größer, je flüchtiger die Flüssigkeit ist (Regnault 1854).

Um die Zunahme der Spannung mit der Temperatur wahrzunehmen, kann man wieder Torricelli'sche Röhren benutzen, in deren Vacuum man eine Flüssigkeit gebracht hat. Sowie die Flüssigkeit in das Vacuum gelangt, sinkt das Quecksilber; der Betrag des Sinkens mißt die Spannung des entstandenen Dampfes. Erhitzt man die Flüssigkeit durch das Ueberschieben eines heißen Metallringes, so fällt das Quecksilber, und zwar um so mehr, je heißer der Metallring ist. Vergleichungen der Spannung mit der Temperatur können vorgenommen werden, wenn man den ganzen Apparat in ein allmälig erhitzbares Oel- oder Wasserbad bringt; man sieht dann das Quecksilber mit zunehmender Temperatur fallen. Wenn endlich die Flüssigkeit über dem Quecksilber zum Sieden kommt, so ist das Quecksilber in der Röhre herabgedrückt bis zum Spiegel des Quecksilbers im Gefäße, woraus sich ergibt, daß beim Siedepunkte die Dampfspannung gleich dem Luftdrucke ist. Für Temperaturen über dem Siedepunkte benutzt man eine hohe, oben offene Glasröhre, die unten umgebogen und zu einem weiten, offenen Gefäße ausgeblasen ist. Dieses füllt man theilweise mit Quecksilber und bringt auf dasselbe die Flüssigkeit, welche alsdann zum Kochen erhitzt wird, um die Luft auszutreiben; wird nun das Gefäß mit einem luftdicht schließenden und ein Thermometer tragenden Stöpsel verschlossen, und nach der Abkühlung abermals erwärmt, so drücken die entstehenden Dämpfe das Quecksilber in der Röhre in die Höhe; der Höhenunterschied der beiden Spiegel gibt die Dampfspannung bei der am Thermometer wahrnehmbaren Temperatur an. Hierzu kann man auch den Papin'schen Topf (Denis Papin 1681) benutzen, ein starkes Metallgefäß mit einem fest aufgeschraubten Deckel, an welchem ein Sicherheitsventil und ein Thermometer angebracht sind; in dem Gefäße ist eine Flüssigkeit, die durch Erhitzung zum Verdampfen gebracht wird; mit dem Dampfraume steht ein Quecksilbergefäß in Verbindung, durch dessen Deckel luftdicht eine hohe Röhre bis in das Quecksilber geht. Der Dampf drückt das Quecksilber in die Röhre; die Höhe der Quecksilbersäule gibt die Dampfspannung bei der an dem Thermometer sichtbaren Temperatur an. Mittels ähnlicher Methoden wurden die Dampfspannungen von zahlreichen Forschern untersucht.

Die folgende Tafel enthält die Resultate von Regnault für Wasserdampf; S bedeutet die Spannung in Millimetern, T die Temperatur.

414 **Tafel der Spannung des Wasserdampfes nach Regnault:**

T	S	T	S	T	S	T	S	T	S	T	S
—32	0,320	11	9,792	37	46,69	63	170,8	89	505,7	170	5962 = 8at
—30	0,386	12	10,46	38	49,30	64	178,7	90	525,4	180	7546 = 10at
—25	0,605	13	11,16	39	52,04	65	186,9	91	545,7	190	9442
—20	0,927	14	11,91	40	54,91	66	195,5	92	566,7	200	11689 = 16at
—15	1,400	15	12,70	41	57,91	67	204,4	93	588,3	210	14325
—10	2,093	16	13,54	42	61,05	68	213,6	94	610,7	220	17390 = 23at
— 9	2,267	17	14,42	43	64,35	69	223,2	95	633,7		
— 8	2,455	18	15,36	44	67,79	70	233,1	96	657,4		
— 7	2,658	19	16,37	45	71,39	71	243,4	97	681,9		
— 6	2,876	20	17,39	46	75,16	72	254,1	98	707,2		
— 5	3,113	21	18,49	47	79,09	73	265,1	99	733,2		
— 4	3,368	22	19,66	48	83,20	74	276,6	100	760,0 = 1at		
— 3	3,644	23	20,89	49	87,50	75	288,5	102	816,1		
— 2	3,941	24	22,18	50	91,98	76	300,8	104	875,4		
— 1	4,263	25	23,55	51	96,66	77	313,5	106	938,5		
0	4,600	26	24,99	52	101,5	78	326,8	108	1003		
1	4,940	27	26,50	53	106,6	79	340,5	110	1075 = 1½at		
2	5,302	28	28,10	54	111,9	80	354,6	115	1269		
3	5,687	29	29,78	55	117,5	81	369,3	120	1491 = 2at		
4	6,097	30	31,55	56	123,2	82	384,4	125	1744		
5	6,534	31	33,41	57	129,3	83	400,1	130	2030		
6	6,998	32	35,36	58	135,5	84	416,3	135	2354 = 3at		
7	7,492	33	37,41	59	142,0	85	433,0	140	2718		
8	8,017	34	39,56	60	148,8	86	450,3	145	3326 = 4at		
9	8,574	35	41,83	61	155,8	87	468,2	150	3581		
10	9,165	36	44,20	62	163,2	88	486,6	160	4652		

Die folgende Tafel gibt an, bei welchen verschiedenen Temperaturen die verschiedenen Dämpfe gleiche Spannungen besitzen, läßt also auch erkennen, wie verschieden die Spannungen verschiedener Dämpfe bei derselben Temperatur sind. Sie sind nach den Siedepunkten geordnet, wodurch auch das angeführte Gesetz augenfällig wird. Aetherdampfmaschinen wären nach dieser Tabelle die vortheilhaftesten, wenn der Aether billiger wäre; noch höher sind die Spannungen der Kohlendioxyddämpfe, bei 0° = 35 Atm., bei 45° = 100 Atm.

415 **Vergleichtafel der Spannungen verschiedener Dämpfe:**

S in Atm.	Aether	Chloroform	Alkohol	Wasser	Quecksilber
1	35°	60°	78	100	357
2	56	83	97	121	397
3	70	98	109	134	423
4	80	109	118	144	442
5	89	119	125	152	458
6	96	127	132	159	472
7	103	134	138	165	484
8	109	141	143	171	494
9	114	147	147	176	505
10	119	152	152	180	514

Die Verminderung der Spannung der Dämpfe von Salzlösungen folgt daraus, daß solche Lösungen einen höheren Siedepunkt haben; da nämlich bei diesem höheren Siedepunkte die Dampfspannung erst gleich dem Luftdrucke ist, so ist sie bei 100° noch nicht gleich dem Luftdrucke, also kleiner wie die Spannung des Dampfes von reinem Wasser bei 100°; folglich ist auch bei anderen Temperaturen die Spannung vermindert; die Verminderung beträgt z. B. für eine Lösung von Kochsalz, die 10 Theile Salz auf 100 Theile Wasser enthält, = 0,06 S, für eine analoge Salpeterlösung = $0{,}0196\, S + 0{,}0000108\, S^2$. — Die Erniedrigung der Spannungen für solche Mischungen, die den chemischen Verbindungen nahekommen, ist dadurch zu erklären, daß chemische Verbindungen, also auch solche Lösungen mit einer Verminderung der Disgregation (Wasser = Wasserstoff + Sauerstoff) verbunden

sind und daher einen höheren Siedepunkt haben, wodurch bei gleicher Temperatur die Spannung geringer wird. — Die Spannung der Dämpfe in Gasen bedarf einer speciellen Betrachtung. —

416 **Die Dampfdichte** ist die Zahl, welche angibt, wie viel mal so groß das Gewicht eines Volumens Dampf ist, als das Gewicht eines gleichen Volumens Luft von gleicher Spannung und gleicher Temperatur. Für stark überhitzte Dämpfe ist die Dichte constant; denn solche Dämpfe gehorchen wie die Luft den Gesetzen von Mariotte und von Gay-Lussac, verändern also das Gewicht eines Volumens mit dem Drucke und mit der Temperatur wie die Luft, so daß das Verhältniß beider Gewichte dasselbe bleibt; und wenn auch die kleinen Abweichungen von jenen Gesetzen bei Dampf und Luft verschieden sein mögen, so ist doch diese Verschiedenheit zu gering, um eine meßbare Veränderlichkeit der Dampfdichte zu ergeben. So ist das Gewicht von Wasserdampf, der weit von der Sättigung entfernt ist, nach Gay-Lussac immer $= 0{,}6235$ oder $= {}^5/_8$ von dem Gewichte eines gleichen Volumens Luft von gleicher Spannung und gleicher Temperatur. — Wenn dagegen die Dämpfe der Sättigung nahe kommen, so werden die Abweichungen von jenen Gesetzen sehr stark, weil nahezu gesättigte Dämpfe halbflüssige Molekülgruppen enthalten; es wird daher das Gewicht eines Volumens nahezu gesättigten Dampfes im Verhältnisse zu dem Gewichte eines gleichen Volumens Luft größer sein als dasselbe Verhältniß bei ungesättigtem Dampfe, die Dampfdichte muß gegen den Sättigungspunkt hin wachsen und im Sättigungszustande am größten sein. Aus demselben Grunde muß die Dichte eines solchen nahezu gesättigten Dampfes bei wachsender Temperatur abnehmen. Noch weniger aber, als demnach das Mariotte'sche und Gay-Lussac'sche Gesetz für nahezu gesättigten Dampf gelten, haben dieselben für die gesättigten Dämpfe selbst Geltung, ein Ergebniß, welches zuerst von Clausius (1850) durch Rechnung aus der mechanischen Wärmetheorie erhalten wurde. Vorher bestimmte man das Gewicht eines Volumens gesättigten Dampfes immer, indem man das Gewicht eines gleichen Volumens Luft von gleichem Drucke und gleicher Temperatur mit der Gay-Lussac'schen Dichte multiplicirte, indem man also annahm, daß das Gewicht des gesättigten Dampfes jenen Gesetzen gemäß sich ebenso ändere, wie das der Luft. Die hierdurch erhaltenen Werthe weichen aber um so mehr von den durch die Theorie berechneten Werthen ab, je höher die Temperatur ist, während die letzteren durch Versuche von Fairbairn und Tate (1860) bestätigt werden.

Practische Bestimmung der Dampfdichte. Ein Volumen Luft von v^{ccm} hat bei t^0 und dem Barometerstande b das Gewicht $0{,}001\,293\,bv : (760\,(1 + \alpha t))$ Gramm; ist das Gewicht des gleichen Volumens Dampf unter gleichen Umständen $= p$, so ist die Dampfdichte $= p \,.\, 760\,(1 + \alpha t) : 0{,}001\,293\,bv$. Zur Auffindung der hierin vorkommenden Größen brachte Gay-Lussac kleine mit genau abgewogenen Flüssigkeitsmengen gefüllte Glaskügelchen in einen mit Quecksilber gefüllten graduirten Glascylinder, der nach dem Princip der pneumatischen Wanne in ein mit Quecksilber gefülltes, gußeisernes Gefäß tauchte und durch ein vollständig umschließendes Bad erwärmt wurde. Die Flüssigkeit in den Kügelchen sprengte bei Erhitzung dieselben und verwandelte sich in Dampf, dessen Volumen und Spannung man aus dem Sinken des Quecksilbers erkannte, während die Temperatur durch eingesenkte Thermometer gemessen wurde. So fand Gay-Lussac die Dichte des Wasserdampfes $= 0{,}623$, des Alkoholdampfes $= 1{,}613$, des Aetherdampfes $= 2{,}586$, des Terpentinöldampfes $=$ [illegible]013. — Dumas benutzte Glasballons von bekanntem Volumen, die in eine feine Spitze ausgezogen waren und die betreffende Flüssigkeit enthielten; in einem Bade von Wasser, Öl oder Chlorzink wurde die Flüssigkeit zum Kochen gebracht und nach völligem Verdampfen derselben die Spitze zugeschmolzen; die Spannung war hier gleich dem Luftdrucke, das Volumen war vorher bestimmt, das Gewicht wurde nach dem Zuschmelzen durch Wiegen gefunden und die Temperatur an eingetauchten Thermometern gemessen. So waren die in der obigen Formel enthaltene Daten gefunden; mit dieser Methode, die von den Chemikern gewöhnlich verwendet wird, fand Dumas die Dichte von Joddampf $= 8{,}716$, von Quecksilberdampf $= 6{,}976$ u. a. m. — Beide Methoden wurden (1845) von Regnault verbessert. Eine neue Verbesserung der Gay-Lussac'schen Methode von Hofmann (1868) besteht darin, daß der graduirte Cylinder 1^m hoch ist und daß demnach die Dämpfe in

der Leere gebildet werden; statt der springenden Kügelchen werden kleine, zugekorkte Glascylinderchen von Geißler angewendet, deren Kork bei der Dampfbildung herausspringt: die Erhitzung geschieht durch einen Glasmantel, durch welchen ununterbrochen ein Strom von Wasser- oder Anilindampf geht. Alle solche Methoden setzen die unbeschränkte Geltung der genannten Gesetze voraus, sind daher nicht absolut genau. Die größere Genauigkeit gewinnen sie durch die

Theoretische Bestimmung der Dampfdichte. Aus der Chemie ist bekannt, daß die Gase sich meist in einfachen Volumverhältnissen mit einander vereinigen, und daß das Volumen der Verbindung in einfachem Verhältnisse steht zu den Volumen der Bestandtheile. So vereinigt sich 1 Vol. Cl mit 1 Vol. H zu 2 Vol. ClH, ebenso 1 Vol. O mit 2 Vol. H zu 2 Vol. H^2O-Dampf. Es erklärt sich dies aus den früher angeführten Hypothesen, daß gleiche Gasvolume gleich viele Gasmoleküle enthalten, und daß auch die Elemente in ihren Aetherhüllen nicht 1, sondern 2 Atome einschließen. Die Vereinigung von 1 Vol. Cl mit 1 Vol. H besteht demnach darin, daß sich in jedes Molekül statt 2 Atomen Cl oder 2 Atomen H, ein Atom Cl und 1 Atom H lagert; hierdurch findet keine Vermehrung oder Verminderung der Moleküle und daher auch weder eine Vergrößerung noch eine Verkleinerung des Volumens statt. Bei der Vereinigung von 2 Vol. H und 1 Vol. H zu H^2O dagegen entstehen Moleküle, von denen jedes aus 2 Atomen H und 1 Atom O besteht, also 3 Atome statt wie vorher 2 enthält; es ist folglich die Zahl der Moleküle nur $^2/_3$ von der unverbundenen Zahl und demnach das Verbindungsvolumen $^2/_3$ von der Summe der unverbundenen Volumina. Nach diesen zwei Hypothesen verhalten sich die Gewichte gleicher Gasvolume wie ihre Molekulargewichte; demnach erhält man die Dichte eines elementaren Gases, indem man das specifische Gewicht des Wasserstoffs mit dem Atomgewichte des Gases oder Dampfes multiplicirt. Das specifische Gewicht von H ist 0,0693, folglich ist das von $O = 0,0693 \cdot 16 = 1,1088$, das von $Cl = 0,0693 \cdot 35,5 =$ 2,458, was mit dem experimentell gefundenen specifischen Gewichte dieser Gase übereinstimmt. Für chemisch zusammengesetzte Gase muß man durch die Zahl der entstehenden Volumina dividiren, um das Gewicht der Volumeneinheit zu finden. So entstehen durch Vereinigung von 2 Vol. H und 1 Vol. O 2 Vol. H^2O; folglich ist die Dampfdichte von $H^2O = {}^1/_2 \cdot 0,0693 \cdot 18 = 0,6237$, was mit Gay-Lussacs Zahl stimmt. Durch diese theoretische Methode ist eine Correctur der practischen Bestimmung dargeboten; dieselbe erlaubt sogar die Bestimmung der Dampfdichte von Körpern, die wir noch gar nicht in Dampfform kennen, wenn nur gasförmige Verbindungen derselben existiren, wie es z. B. beim Kohlenstoff der Fall ist. Wie bei der Bildung von Salzsäure das Verbindungsvolumen doppelt so groß ist, als das Volumen jedes Bestandtheils, so ist auch das Volumen von CO doppelt so groß als das von O, also auch doppelt so groß als das von C-Dampf; folglich hat man in CO 1 Vol. C-Dampf und 1 Vol. O. Es steht demnach die Dichte des hypothetischen C-Dampfes zur Dichte von O in dem Verhältnisse der Atomgewichte: die Dampfdichte von $C = 1,1088 \cdot 12 : 16 = 0,831$.

Es ist leicht ersichtlich, daß man aus dem Satze, die Gewichte gleicher Gasvolume oder die Dampfdichten verhalten sich wie die Molekulargewichte, nicht blos die Dampfdichten bestimmen kann, wenn die Molekulargewichte bekannt sind, sondern auch die Molekular- und **Atomgewichte**, wenn die Dampfdichten bekannt sind, und zwar die letzteren einfach, indem man die Dampfdichten auf $H = 1$ bezieht. So sind die sp. G. von H, F, Cl, Br- und J-Dampf bezüglich 0,0693; 1,31; 2,44; 5,39; 8,71. Bezieht man dieselben auf $H = 1$, so erhält man 1, 19, 35,5, 80 und 127, die Atomgewichte der 5 Elemente. Ebenso läßt sich auch das Atomgewicht eines Elementes bestimmen, wenn die Dampfdichten flüchtiger Verbindungen desselben und der mit demselben verbundenen Elemente bekannt sind.

Wenn in dem Vorausgehenden die Dampfdichte als eine constante Größe dargestellt wurde, so darf dies doch nicht so aufgefaßt werden, als ob der Dampf eines Stoffes unter allen Spannungen und Temperaturen bei gleichem Volumen dasselbe Gewicht habe; man hat sich vielmehr für jeden Dampf von beliebiger Temperatur und Spannung ein gleiches Volumen Luft von gleicher Temperatur und Spannung vorzustellen; dann ist das Gewicht des Dampfvolumens soviel mal größer als das des Luftvolums, als es die Dampfdichte angibt. Da aber ein und dasselbe Luftvolum bei verschiedener Temperatur und Spannung das verschiedenste Gewicht hat, so ist auch das Gewicht eines und desselben Dampfvolumens von sehr verschiedener Größe. Die ältere Methode, solche Dampfgewichte zu berechnen, indem man das Gewicht $0,001293\, bv : (760\,(1 + \alpha t))$ eines Volumens Luft mit der Dampfdichte multiplicirte, liefert indessen selbst für überhitzte Dämpfe keine ganz richtigen Resultate, indem die Dampfdichte nicht ganz constant ist und in der Nähe der Sättigung etwas größer wird, was insbesondere für Ameisensäure von Bineau, für Essigsäure von Cahours und für Wasserdampf von Regnault nachgewiesen wurde; noch weniger genau

werden diese Resultate aber für gesättigte Dämpfe. So gibt Zeuner (1866) für das Gewicht von 1cbm gesättigten Wasserdampfes bei 1at 0,6059kg, bei 2at 1,631kg, bei 5at 2,75kg, bei 10at 5,2703kg nach den Resultaten der mechanischen Wärmetheorie, während nach der älteren Methode sich die Zahlen 0,5892, 1,1167, 2,5841 und 4,8479 ergeben. Ebenso berechnet Clausius (1864) aus den Formeln der mechanischen Wärmetheorie das Volum von 1kg gesättigten Dampfes bei 58° = 8,23cbm, bei 92° = 2,11cbm, bei 124° = 0,769cbm, bei 144° = 0,4370cbm, welche Zahlen mit den neueren Versuchen von Fairbairn und Tate übereinstimmen, während die ältere Methode die Resultate ergibt 8,38, 2,18, 0,809, 0,466. Man sieht aus diesen Angaben, daß die Abweichung mit der Temperatur zunimmt, daß also die beiden Gesetze für gesättigten Dampf bei höherer Temperatur immer weniger gelten. Aus diesen Zahlen ist weiter ersichtlich, daß, Dichte im gewöhnlichen Sinne gefaßt, der gesättigte Dampf bei höherer Temperatur immer dichter wird; während 1cbm gesättigten Wasserdampfes von 1/10 at Spannung nur 1/16 kg wiegt, hat dasselbe Vol. bei 14at 7kg Gewicht (Zeuner).

Die starke Abweichung gesättigter Dämpfe bei hoher Temperatur von den beiden Gesetzen zeigen besonders deutlich Cagniard de la Tours Versuche (1822). Derselbe hatte eine sehr starke, zweischenkelige, vollständig geschlossene Glasröhre theilweise mit Quecksilber gefüllt, über welchem in dem kürzeren, weiteren, gefäßartigen Schenkel sich Wasser, Alkohol, Aether oder Schwefelkohlenstoff befand. Bei Temperaturen von bezüglich 400, 259, 200, 275° verschwanden die Flüssigkeiten, waren also in Dampf verwandelt, der das 2—3fache Volumen der Flüssigkeit einnahm und für die 3 letzten Flüssigkeiten Spannungen von 119, 37 und 38 Atm. angenommen hatte. Nun läßt sich aber leicht berechnen, daß z. B. das specifische Gewicht des Aetherdampfes, dessen Dichte = 2,586 ist, in Bezug auf Wasser bei einer Temperatur von 200° etwa 0,08 beträgt, während in Cagniards Versuchen das specifische Gewicht gleich der Hälfte von dem des Aethers, also = 0,355 war, gewiß eine bedeutende Abweichung.

Wie in einem gaserfüllten Raume die Spannung eines Dampfes gleich derjenigen in einem leeren Raume von gleicher Temperatur ist, so hat auch die Dampfdichte in einem gaserfüllten Raume z. B. in der Luft nahezu denselben Werth wie im leeren Raume; wenigstens für den Wasserdampf darf man bei Temperaturen, wie sie in unserem Klima vorkommen, die Dichte in der Luft nach Regnault = 0,625 festhalten, was für die Berechnung der Feuchtigkeit der Luft von Wichtigkeit ist. Erheblicher sind nach Regnault die Abweichungen bei flüchtigeren Flüssigkeiten.

417 **Spannung und Dichte überhitzter Dämpfe.** Sehr stark überhitzte Dämpfe, die jenseits des Uebergangszustandes liegen, verhalten sich wie vollkommene Gase; für sie gilt also das Mariotte-Gaylussac'sche Gesetz

$$vp = v_0 p_0 (1 + \alpha t) \;\ldots\ldots\; (44) \text{ (Seite 445).}$$

Bleibt der Druck p derselbe, geschieht also die Erhitzung an freier Luft, so ist $v = v_0 (1 + \alpha t)$, das Volumen nimmt für jeden Grad um α oder $1/273$ zu. Bleibt das Volumen dasselbe, ist also der Dampf eingeschlossen, so ist $p = p_0 (1 + \alpha t)$, die Spannung nimmt für jeden Grad um $1/273$ zu. Setzt man in der Fl. (44) für α seinen Werth 0,003665 oder $1/273$, so ist $pv = p_0 v_0 \alpha (273 + t)$ oder $pv = BT$, worin B das constante Product $p_0 v_0 \alpha$ und T die absolute Temperatur $273 + t$ bedeutet.

Für den Uebergangszustand nun gilt dieses Gesetz nicht; die Untersuchungen Zeuners (1866) geben dagegen für schwach überhitzte Wasserdämpfe folgendes Gesetz

$$pv = BT - C\sqrt{p} \;\ldots\ldots\ldots\ldots\; (45)$$

worin die Constante $B = 0,0049287$ und die Constante $C = 0,18781$. Nach den Versuchen von Hirn stimmen die Resultate dieser Formel mit den Ergebnissen der Erfahrung. Die Eigenschaften der überhitzten Dämpfe werden neuerdings wichtig, weil man in manchen Dampfmaschinen überhitzte Wasserdämpfe anwendet, um Brennstoff zu sparen.

Berechnet man z. B. für überhitzten Dampf von 200° bei 3, 4 und 5at Spannung aus Zeuners Formel das Volumen v von 1kg Dampf, so ergeben sich 0,6947cbm, 0,5164cbm und 0,4150cbm, während Hirns Versuche 0,697cbm, 0,522cbm, 0,414cbm ergeben, eine so kleine Abweichung, daß sie in die Grenzen der Beobachtungs- und Rechnungsungenauigkeiten fällt. — Neuere Autoren bezeichnen das angegebene Volumen von 1kg Dampf in cbm mit dem Namen des specifischen Dampfvolumens, welcher in der älteren Mechanik

eine etwas andere Bedeutung hatte; man verstand nämlich unter dem specifischen Dampfvolumen die Zahl, welche anzeigt, wieviel mal so groß das Volumen des Dampfes ist als dasjenige des Wassers, aus welchem er sich gebildet hat; für Dampf von 1^{at} ist dieses specifische Volumen = 1700, für Dampf von 2^{at} nahezu = 900. Ebenso versteht Zeuner auch unter Dichtigkeit des Dampfes nicht den in 416. besprochenen Begriff, sondern das Gewicht von 1^{cbm} Dampf in kg, eine Verschiedenheit, welche der Aufmerksamkeit der Studirenden zu empfehlen ist.

418 **Der Siedepunkt** (Dalton 1801) ist diejenige Temperatur, bei welcher in einer Flüssigkeit Dampfblasen aufsteigen und das für das Kochen oder Sieden charakteristische Aufwallen veranlassen. Da die Temperatur der siedenden Flüssigkeit häufig nicht mit der des entstehenden Dampfes übereinstimmt, und da die letztere viel unabhängiger von Nebenumständen ist als die erstere, so ist man übereingekommen, den Siedepunkt durch die Temperatur auszudrücken, welche ein in den Dämpfen hängendes Thermometer angibt, vorausgesetzt, daß dasselbe vor fremden Einflüssen geschützt ist. Der Siedepunkt ist für verschiedene Flüssigkeiten unter sonst gleichen Umständen verschieden, er liegt im Allgemeinen um so tiefer, je leichter verdampfbar, je flüchtiger die Flüssigkeit ist. Für eine und dieselbe Flüssigkeit, vorausgesetzt, daß sich in derselben Gasbläschen befinden, hängt der Siedepunkt in erster Linie von dem äußeren Drucke ab, welcher durch Luft, Dampf oder drgl. auf die Flüssigkeit ausgeübt wird. Dieser Einfluß des äußeren Druckes ist in folgendem Gesetze ausgesprochen: *Der Siedepunkt ist gleich derjenigen Temperatur, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleichkommt.* Demnach ist der Siedepunkt einer und derselben Flüssigkeit sehr veränderlich; spricht man von dem Siedepunkte kurzweg, so wird gewöhnlich das Vorhandensein des Druckes von $1^{at} = 760^{mm}$ Quecksilber vorausgesetzt, sowie das Vorhandensein von Luftbläschen in der Flüssigkeit. Sind solche Luftbläschen nicht vorhanden (Dufour 1864), können dieselben nicht aus den porösen Unreinigkeiten der Gefäßwände sich entwickeln (Schröder 1870), so wird der Siedepunkt bedeutend erhöht. Die Temperatur der Flüssigkeit ist immer etwas höher als die des Dampfes; diese Erhöhung hängt ab von der Beschaffenheit der Gefäßwände, von der Höhe der Flüssigkeit und von dem Widerstande der Flüssigkeitshaut, also auch von der Cohäsion der Flüssigkeit. Lösungen von nicht flüchtigen festen Körpern sieden erst bei höherer Erhitzung als das reine Lösungsmittel und entwickeln auch Dampf von höherer Temperatur aber von derselben Spannung als das Lösungsmittel (Magnus 1862). Gemenge mischbarer Flüssigkeiten haben einen Siedepunkt zwischen den Siedepunkten der Gemengtheile, der einem derselben um so näher kommt, je mehr das Gemenge von diesem Gemengtheile enthält. Merkwürdig sind die Untersuchungen Kopps (1855) über die Siedepunkte homologer Reihen, d. i. solcher organischen Verbindungen, deren molekulare Zusammensetzung sich um ein und dasselbe Molekül von Kohlenstoff und Wasserstoff unterscheidet; Kopp fand nämlich, daß einer derselben Zusammensetzungsdifferenz auch sehr oft dieselbe Siedepunktsdifferenz entspreche. — In allzuheißen Gefäßen sieden geringe Mengen von Flüssigkeit nicht (s. d. sphäroidalen Zustand).

Siedepunkte einiger Flüssigkeiten bei 760^{mm} Druck.

Zink	1040°	Salpetersäure	86°
Quecksilber	360	Steinöl	85
Schwefelsäure	325	Benzol	80,4
Leinöl	316	Alkohol	78,3
Schwefel	316	Essigäther	74,3
Terpentinöl	293	Holzgeist	65,5
Benzoëäther	209	Schwefelkohlenstoff	46,6
Jod	175	Aether	34,9
Zinnchlorid	120	Aldehyd	20,8
Wasser	100	Chlorwasserstoffäther	11

Wird der Druck geringer, so wird der Siedepunkt niedriger. Wasser siedet auf dem Chimborasso bei 77°, auf dem Montblanc bei 85°, auf dem St. Bernhard bei 92°; der Siedepunkt kann aus der Tafel 414. entnommen werden; für eine bestimmte Spannung S ist immer der Siedepunkt gleich der neben derselben stehenden Temperatur T, bei welcher der Wasserdampf die betreffende Spannung hat; so ist er bei $^1/_2$at = 82°, bei $^1/_4$at 65°, bei 0,1at = 46°, bei $^1/_{20}$at = 33°, bei 0,01at = 7°, bei 4,6mm Spannung = 0°; Wasser siedet also selbst bei 0°, wenn nur der Luftdruck gering genug ist. Von dieser Erniedrigung des Siedepunktes überzeugt man sich durch Luftpumpenversuche; unter der ausgepumpten Glocke kocht Wasser bei gewöhnlicher Temperatur. Auch folgender Versuch gibt einen einfachen Nachweis. Man bringt Wasser in einem Kochfläschchen zu lebhaftem Sieden, verkorkt dasselbe dann rasch und kehrt es um; noch $^1/_2$ Stunde später fängt es immer wieder an zu kochen, wenn man durch Aufgießen von kaltem Wasser die entstandenen Dämpfe durch Condensation beseitigt und so über dem Wasser einen luftverdünnten Raum schafft. Auch der Wasserhammer und der Pulshammer sind leicht verständliche Nachweise. Man benutzt dieses frühere Kochen bei geringerem Drucke in den Zuckerfabriken, wo man den Zuckersaft in den Vacuumpfannen mit Anwendung geringerer Temperatur concentrirt, sowie auch zum Höhenmessen mittels des Thermohypsometers; dasselbe gibt die Temperatur an, bei welcher in einer gewissen Höhe das Wasser siedet; aus der Differenz der Siedepunkte erhält man nach Kemp die betreffende Höhe, wenn man jene Differenz mit 291m multiplicirt.

Wird der Druck stärker, so wird der Siedepunkt erhöht. Für das Wasser ergibt die Tafel 414., daß es unter 2at bei 120°, unter 3at bei 135°, unter 4at bei 145°, unter 8at bei 170°, unter 16at bei 200° siedet. Von diesen Siedepunkterhöhungen überzeugt man sich durch Versuche mit dem Papin'schen Topf. Mit einem solchen Sparkochtopfe kann man auch auf hohen Bergen Fleisch gar kochen, sowie Stoffe extrahiren, die bei offenem Kochen kein Extract liefern, außerdem das gewöhnliche Kochen rascher und billiger vornehmen u. s. w. Für Hochdruckdampfmaschinen hat das Kesselwasser eine höhere Temperatur als 100°, weil der Dampf eine Spannung von mehreren Atmosphären haben muß. Tritt in einem solchen hochgespannten Kessel plötzlich eine Druckverminderung ein, z. B. durch Oeffnen des Sicherheitsventiles oder durch Entstehung eines Risses in der Kesselwand, so verwandelt sich eine große Menge des hocherhitzten Wassers plötzlich in Dampf, worin nach Kayser (1865) eine Ursache der Dampfkesselexplosionen zu suchen ist. — Durch eine ähnliche Wirkung von hocherhitztem Wasser erklärt Bunsen (1846) die intermittirenden Ausbrüche des großen Geiser und des Strokr auf der Insel Island.

Warum der Siedepunkt gleich derjenigen Temperatur ist, bei welcher die Dampfspannung dem äußeren Drucke gleich kommt, geht aus der in 410. vorgetragenen Theorie der Verdampfung hervor. Der Dampf kann nur dann die kleinen Luftbläschen zu Dampfblasen erweitern, wenn seine Spannung den auf diesen Bläschen lastenden Druck überwinden kann; da neben dem äußeren Luft- oder Dampfdrucke auch noch der Druck der über den Bläschen lastenden Flüssigkeitsäule einwirkt, so muß die Temperatur der Flüssigkeit in den tieferen Schichten um einen geringen Grad höher sein als die des Dampfes, der oben abströmt, und der sich, falls er eine höhere Temperatur und Spannung besäße, sofort durch Ausdehnung etwas abkühlt und herabspannt. Das Vorhandensein solcher Luftbläschen ist hiernach unumgänglich nöthig, wenn eine Flüssigkeit bei ihrem dem äußeren Drucke entsprechenden Siedepunkte kochen soll; fehlen diese Luftbläschen, so wird die Flüssigkeit auch bei erreichtem Siedepunkte nicht sieden. Sie kann alsdann erst bei einer höheren Temperatur zum Sieden kommen, wo die lebendige Kraft der Moleküle so gewachsen ist, daß durch ein günstiges Zusammentreffen der schwingenden, wälzenden und fortschreitenden Bewegung sich mehrere Moleküle aus einander werfen und dadurch selbst ein Dampfbläschen bilden; dieses wird sich dann sofort vergrößern, aufsteigen, zertheilen, und so zur Bildung zahlreicher Dampfblasen, zur plötzlichen Erzeugung einer großen stoßenden Dampfmenge Anlaß geben. Die Erhöhung des Siedepunktes, welche durch Luftentziehung erzeugt wird, nennt man Siedeverzug (Dufour 1864) und die Flüssigkeit, die über ihren Siedepunkt hinaus erwärmt ist, eine überhitzte Flüssigkeit. Dufour benutzte zu seinen Versuchen eine Retorte, durch deren Tubulus ein Thermometer in die Flüssigkeit ging, und an deren Hals eine kühl gehaltene Blechvorlage mit einer Luftpumpe communicirte. Wurde nun nach dem Kochen der Flüssigkeit der Dampf mit der Vorsicht weggepumpt, daß die Flüssigkeit keine Erschütterung erlitt, so blieb das Sieden derselben aus, wenn auch der Druck weit unter die Spannung erniedrigt war, welche der Temperatur der Flüssigkeit entsprach. Je länger das Wasser gekocht war, desto stärker konnte der Siedeverzug werden; die geringste Erschütterung brachte dann aber ein heftiges, stoßweises Sieden hervor, ebenso Gasentwickelung in der Flüssigkeit durch Wasserzersetzung mittels zweier vorher schon eingeführten Polspitzte, ebenso plötzliche Erhitzung oder eine plötzliche noch viel weiter gehende Druckver-

minderung. In ähnlicher Weise mögen manche Dampfkessel-Explosionen entstehen; nach dem Abstellen einer Dampfmaschine kühlt sich allmälig der Dampf ab und condensirt sich, während das Wasser noch heiß bleibt und wegen seiner Luftarmuth und der ringsum herrschenden Ruhe einen Siedeverzug erfährt. Wird nun die Maschine in Gang gesetzt, so entsteht eine stoßweise, massenhafte Dampfentwickelung, wodurch der Kessel zerstört werden kann. Nach Schröder (1870) ist die im Wasser gelöste Luft nicht fähig, die nöthigen Luftbläschen zu bilden, da dieselbe durch die Lösung in den flüssigen Zustand versetzt sei. Diese Behauptung wird allerdings durch einen Versuch Dufours bestätigt; Leinöl wurde mit Nelkenöl zu einer Flüssigkeit von dem specifischen Gewichte kochend heißen Wassers gemischt und in dieser Mischung eine kleine, sehr lufthaltige Wasserkugel bis zu 178° erhitzt, ohne daß dieselbe sich in Dampf verwandelte; wurde aber der Tropfen mit einem festen Körper berührt, so entstand sofort eine rasche Verdampfung. Es ist also nicht die im Wasser gelöste Luft, welche das Sieden befördert, sondern die in den Poren der an den Gefäßwänden adhärirenden Unreinigkeiten vorhandene Luft, welche die nöthigen Luftbläschen bildet; ganz entsprechend ist die allgemein bekannte Erscheinung, daß das Kochen an den Gefäßwänden beginnt, sowie die Beobachtung von Marcet (1846), daß die Beschaffenheit der Gefäßwände einen wesentlichen Einfluß auf die Temperatur der siedenden Flüssigkeit ausübt. So siedet Wasser in Metallgefäßen eher als in gläsernen, und wird auch in den letzteren die Siedetemperatur erniedrigt, wenn man Eisenfeilspäne in das Wasser wirft; früher meinte man, die Ursache liege in der größeren Adhäsion des Wassers gegen das Glas; jetzt sieht man dieselbe in der größeren Luftmenge, welche den Metallen adhärirt, was noch insbesondere dadurch bekräftigt wird, daß eine stärkere Reinigung von Glasgefäßen mit Schwefelsäure oder ein Ueberziehen derselben mit Gummilack die Siedetemperatur des Wassers um mehrere Grade erhöht.

Daß die Siedetemperatur von Lösungen fester Körper höher ist als die des reinen Lösungsmittels, erklärt man dadurch, daß die Anziehung der Theilchen des festen Körpers gegen die Flüssigkeitstheilchen größer ist, als die Anziehung der Flüssigkeitstheilchen unter sich; hieraus folgt denn auch, daß die Erhöhung mit dem Gehalte der Lösung wächst, ohne indessen demselben genau proportional zu sein. Nach Legrand (1836) siedet eine wässerige Lösung von 8% Kochsalzgehalt bei 101°, von 23% bei 104, von 40% bei 108°, eine Lösung von 9% Natriumsalpeter bei 101°, von 81% bei 108, von 150% bei 115, von 212% bei 120. Der hierbei entstehende Dampf ist reiner Wasserdampf, wenn wie in diesen Beispielen der gelöste Körper nicht flüchtig ist; er ist heißer als 100°, weil er in das heißere Wasser eingebettet war; er hat aber nur eine Spannung gleich dem äußeren Drucke, wie sie der Dampf von 100° besitzt, weil wegen der Anziehung der Salztheilchen die Dampfmenge geringer ist als über reinem Wasser, und weil sonach die durch die höhere Temperatur veranlaßte Spannungserhöhung durch die geringere Dampfdichte aufgehoben wird.

In ähnlicher Weise wird der Siedepunkt einer Flüssigkeit erhöht durch Zumischung einer mit derselben mischbaren weniger flüchtigen Flüssigkeit und erniedrigt durch Zumischung einer flüchtigeren Flüssigkeit. Nach Alluard (1864) siedet ein Gemisch von 300g Schwefelkohlenstoff mit 150g Aether bei 38°, mit 80g Aether bei 40°, mit 30g Aether bei 43°, mit 15g Aether bei 45°; ebenso Wasser mit 66% Alkohol bei 83°, mit 33% bei 84°, mit 20% bei 86°, mit 10% bei 90°, mit 5% bei 93°, mit 2% bei 97°; geringe Beimischung ändert den Siedepunkt nicht. Nach der gewöhnlichen Anschauung siedet bei dem Siedepunkte eines Gemisches nur der flüchtigere Gemengtheil, reißt aber Dämpfe des anderen in geringer Menge mit fort; wird dieses abgeströmte Dampfgemenge abgekühlt, so erhält man eine Flüssigkeit mit reicherem Gehalte von dem flüchtigeren Stoffe. Hierauf beruht die Trennung von Gemengen durch Destillation, wie z. B. die Branntwein- und Spiritusbereitung. Da das zurückbleibende Gemenge reicher an der weniger flüchtigen Substanz ist, so erhöht sich der Siedepunkt eines Gemenges fortwährend. Nach Alluard ist die Trennung durch Destillation unmöglich, wenn das Gemisch nur einen gewissen, geringen Bruchtheil der einen Flüssigkeit enthält; das Gemenge siedet dann als solches. Dies ist auch der Fall, wenn die Stoffe ein Gemisch nach festen Verhältnissen bilden, was nach Berthelot (1863) geschieht, wenn die Spannung der Dämpfe der Dichte derselben umgekehrt proportional ist. So läßt sich ein Gemenge von 8% Wasser und 92% Alkohol nicht durch Sieden zerlegen, ebenso nicht das Gemisch von 8% Alkohol und 92% Schwefelkohlenstoff; ein Gemenge von 9% Alkohol und 91% Schwefelkohlenstoff hat einen constanten Siedepunkt von 43°. Das Gemisch hat in solchen Fällen etwas von der Beständigkeit chemischer Verbindungen, ohne indessen eine atomistische Zusammensetzung zu besitzen. — Auch der gegentheilige Fall kommt vor, daß das Gemisch einen höheren Siedepunkt als die beiden Bestandtheile hat; beim Sieden entweicht dann der überschüssige Bestandtheil bis zu einem gewissen festen Mischungsverhältnisse, das dann als solches einen

constanten Siedepunkt hat. So entweicht bei dem Kochen von wässeriger Salzsäure unter fortwährendem Steigen des Siedepunktes Wasser, bei dem Kochen von starker Salzsäure ebenfalls unter stetem Steigen des Siedepunktes fortwährend Chlorwasserstoff, bis in beiden Fällen ein Gemisch von 20% ClH und 80% H^2O bleibt, das den constanten höheren Siedepunkt 110° hat. — Endlich kommt auch die entgegengesetzte Erscheinung vor, daß Flüssigkeitsgemische einen Siedepunkt haben, der noch unter dem Siedepunkte des flüchtigen Gemengtheiles liegt; dies ist der Fall, wenn die Gemengtheile nicht mischbar sind, weil alsdann (nach 413.) die Spannung des Dampfes gleich der Summe der Spannungen der beiden Dämpfe bei derselben Temperatur ist, und weil demnach die dem Luftdrucke gleiche, das Sieden hervorrufende Spannung früher erreicht ist. So siedet ein Gemisch von Wasser und Schwefelkohlenstoff bei 43°, während Schwefelkohlenstoff für sich allein den Siedepunkt 46,6° besitzt. Darauf beruht folgender interessante Versuch von Kundt (1870): Mischt man Wasser von 45° und Schwefelkohlenstoff von 45°, so kocht das Gemisch lebhaft auf und fängt beim Aufrühren mit einem Glasstabe immer von Neuem zu kochen an.

Kopp fand, daß bei vielen homologen Reihen der Zusammensetzungsdifferenz CH^2 eine Siedepunktsdifferenz von 19° entspricht; so siedet in der Ameisensäurereihe die Ameisensäure CH^2O^2 bei 99°, die Essigsäure $C^2H^4O^2$ bei 128°, die Propionsäure $C^3H^6O^2$ bei 137°, die Buttersäure $C^4H^8O^2$ bei 156°, die Valeriansäure $C^5H^{10}O^2$ bei 175°; ebenso siedet in der Alkoholreihe der Holzgeist CH^4O bei 59°, der Weingeist C^2H^6O bei 78°, der Propylalkohol C^3H^8O bei 97°, der Butylalkohol $C^4H^{10}O$ bei 116°, der Amylalkohol $C^5H^{12}O$ bei 135°. Doch gibt es auch Reihen, die für dieselbe molekulare Differenz CH^2 eine größere oder geringere Siedepunktsdifferenz besitzen; so hat die Reihe der Grenzkohlenwasserstoffe C_nH_{2n+2} die Siedepunktsdifferenz 30°, die Benzolreihe 24°, und die Bromäthylenreihe nur 15°. Unter den Isomeren der Grenzkohlenwasserstoffe haben die von normaler Structur die höchsten Siedepunkte. Als allgemeines Gesetz läßt sich angeben, daß mit der Anhäufung von Methylgruppen (CH_3) im Molekül die Siedepunkte erniedrigt werden.

Die Dampfwärme (Black 1762, Watt 1765, Regnault 1847). Unter Dampfwärme verstehen wir diejenige Wärmemenge, welche nothwendig ist, um die Gewichtseinheit eines flüssigen Körpers von bestimmter Temperatur in Dampf von derselben Temperatur zu verwandeln. Hiermit ist ausgesprochen, daß die dem flüssigen Körper zugeführte Dampfwärme durch die Verdampfung verzehrt, als Wärme verschwunden, für das Thermometer und das Gefühl nicht mehr vorhanden ist, weil sie (nach der in 410. vorgetragenen Theorie der Verdampfung) theils für die innere Arbeit der Trennung der Moleküle, theils für die äußere Arbeit der Ueberwindung eines äußeren Druckes verbraucht wurde. Zur Zeit der Geltung des Wärmestoffes konnte ein Verschwinden von Wärme nicht zugegeben werden; man dachte sich daher den Wärmestoff im Inneren der Luftarten festgehalten und nannte die Dampfwärme demgemäß latente oder gebundene Wärme des Dampfes. Die Dampfwärme des Wasserdampfes von 100° (1^at^ Spannung) beträgt 536,5^c^; d. h. um 1^kg^ Wasser von 100° in 1^kg^ Dampf von 100° zu verwandeln, müssen 536,5^c^ verbraucht werden, d. i. eine Wärmemenge, mit der man 536,5^kg^ Wasser um 1° erwärmen könnte. Dieser hohe Wärmeverbrauch, der einer Arbeit von 227476^mk^ gleichkommt, gibt uns ein Bild von der Größe der inneren Vorgänge bei einer solchen Verwandlung. Indessen scheint von den bis jetzt untersuchten Flüssigkeiten nur das Kohlendioxyd eine höhere Dampfwärme als das Wasser zu besitzen, alle übrigen aber eine bedeutend geringere; so ist die des Alkohols von 80° nur = 213^c^, die des Aethers von 35° sogar nur = 90^c^. Der größere Theil der Dampfwärme wird zu innerer Arbeit, zur Ueberwindung von Anziehung, zur Ertheilung einer größeren Geschwindigkeit an die Moleküle verbraucht, der kleinere Theil zu äußerer Arbeit, zur Ueberwindung des äußeren Druckes. Dieser Theil wird gemessen durch Apu, worin A das calorische Aequivalent der Arbeitseinheit, $= {}^1/_{424}{}^c$, p den äußeren Druck und u die Volumvergrößerung bedeutet. Diese äußere Dampfwärme beträgt z. B. für Wasserdampf von 100° nur 40,2^c^, während der Rest 496,3^c^ die innere Dampfwärme bildet, diejenige Wärmemenge, welche Dampf von 100° mehr enthält als die gleiche Wassermenge von 100°. Die äußere Dampfwärme ist bei flüchtigeren Flüssigkeiten kleiner, beträgt z. B. für siedheißen Aether-

419

dampf nur 8°, für Chloroformdampf nur 5°; sie wird bei wachsender Temperatur größer, weil alsdann der äußere Druck größer wird; so ist sie z. B. für Wasserdampf von 0° gleich 31°, von 100° = 40,2°, von 200° = 47°. Auch die innere Dampfwärme ist für flüchtigere Flüssigkeiten kleiner, indeß ebenso wenig wie die äußere dem Siedepunkte proportional. Für siedheißen Aetherdampf ist sie 82°, für den später siedenden Chloroformdampf nur 56°; im Gegensatze zur äußeren wird die innere Dampfwärme bei steigender Temperatur kleiner, weil dann der Dampf dichter ist; so ist für Wasserdampf von 0° die innere Dampfwärme = 575°, bei 100° = 496°, bei 200° = 417°; und dieses Abnehmen der inneren Dampfwärme mit steigender Temperatur ist bedeutender als die entsprechende Zunahme der äußeren Dampfwärme, so daß im Ganzen die Dampfwärme bei steigender Temperatur abnimmt. So ist die Dampfwärme des Wasserdampfes von 0° = 606°, von 100° = 536°, von 150° = 500°, von 200° = 464°.

In den Dampftabellen, die in besonderer Vollkommenheit in Zeuners „Grundzüge der mechanischen Wärmetheorie" aufgenommen sind, befinden sich auch Tabellen über die Volumina von 1^{kg} Dampf bei verschiedenen Temperaturen. Dividirt man die Dampfwärme durch die entsprechenden Volumina, so erhält man die Dampfwärme der Volumeneinheit, des Cubikmeters Dampf. Dieselbe zeigt ein besonders starkes Wachsthum mit der Temperatur. So ist die Dampfwärme in 1^{cbm} Wasserdampf von 0° = 2,9°, von 100° = 325°, von 150° = 1304°, von 290° = 3602°, in 1^{cbm} Kohlendioxyd von — 25° = 3178°, von 45° = 14937°. — Zu den interessantesten Ergebnissen der mechanischen Wärmetheorie gehört die Wahrheit, daß diese Dampfwärme der absoluten Temperatur und einer Temperaturfunction des Druckes proportional ist und gefunden werden kann, indem man das Product dieser zwei Größen mit A = $^1/_{424}$°, dem calorischen Aequivalent der Arbeitseinheit multiplicirt. Man kann demnach, falls man das Spannungsgesetz eines Dampfes kennt, die Dampfwärme der Volumeneinheit berechnen. Wären dann noch die Volumina von 1^{kg} Dampf bei verschiedenen Spannungen bekannt, so könnte man auch die Dampfwärme der Gewichtseinheit finden. Für den Wasserdampf kennt man durch Versuche von Fairbairn und Tate (1860) die Volumina von 1^{kg} Dampf bei verschiedenen Spannungen und kann demnach die Dampfwärme a priori berechnen; eine solche Rechnung ist in Aufg. 671 durchgeführt. Die hierbei sich ergebende Uebereinstimmung mit den genauesten Versuchsresultaten, mit denen Regnaults, ist eine neue, schöne Bestätigung der Grundsätze der mechanischen Wärmetheorie.

Despretz (1823) verglich die Dampfwärme verschiedener Stoffe bei gleicher Dampfspannung mit den Dichten dieser Dämpfe, und glaubte danach das Gesetz aussprechen zu dürfen, daß bei gleichem Drucke die Dampfwärme verschiedener Dämpfe im umgekehrten Verhältnisse zu der Dichtigkeit stehe. Regnaults ausgedehnte Versuche haben dieses Gesetz nicht bestätigt. Zeuner (1866) berechnete, daß bei 1^{at} das Verhältniß der Dampfwärme zum Dampfvolumen für Wasser = 325, für Aether = 268, für Schwefelkohlenstoff = 253 sei; bei 10^{at} ergab sich das Verhältniß für Wasser = 2535, für Chloroform 1917, für Quecksilber 2250. Ebenso wenig hat sich das seinerzeit hochangesehene Gesetz von Watt bestätigt, daß die Summe der latenten und der fühlbaren Wärmemenge des Wasserdampfes für alle Temperaturen constant sei. Watt zählte nämlich die Wärme, die zur Erwärmung des Wassers von 0° an bis zur Verdampfungstemperatur nöthig ist, die sogenannte Flüssigkeitswärme, zu der eigentlichen Dampfwärme, und erhielt so bei den damals noch ungenauen Versuchsresultaten nahezu gleiche Werthe für die sogenannte Gesammtwärme des Dampfes bei verschiedenen Temperaturen und Spannungen. Die Gesammtwärme ist aber bei 0° = 606,5 + 0 = 606,5°, bei 50° = 571 + 50 = 626°, bei 100° = 536 + 100 = 636°, bei 150° = 501 + 150 = 651°, bei 200° = 464 + 200 = 664°, weicht also ziemlich stark von Watts Gesetz ab.

Zur Bestimmung der Dampfwärme haben alle Untersucher von Watt bis auf Brix (1842) und Regnault das Wassercalorimeter angewendet. Dasselbe besteht aus

einem mit Wasser von bestimmter Temperatur gefüllten Gefäße, durch welches ein metallenes Schlangenrohr, oft auch durch hohle Metallkugeln unterbrochen, hindurchgeht. Der Dampf streicht durch dieses Rohr und wird condensirt, indem er seine Dampfwärme an das Wasser abgibt; aus der Menge der unten abfließenden Condensationsflüssigkeit und der Temperaturerhöhung, welche das Calorimeterwasser erfahren hat, läßt sich die abgegebene Dampfwärme berechnen. Es wird also hier nicht eigentlich die beim Verdampfen in die Flüssigkeit eingetretene, sondern diejenige Wärmemenge gemessen, welche bei der Umkehrung des Verdampfens, bei der Condensation aus dem Dampfe heraustritt; unter Voraussetzung gleichen Druckes und gleicher Temperatur sind diese zwei Wärmemengen allerdings einander gleich. Nur der älteste, übrigens sehr ungenaue Versuch von Black maß die eintretende Wärmemenge durch Beobachtung der Zeit, die ein auf einem gleichmäßig erhitzten Ofen stehendes Gefäß voll Wasser zur Verdampfung bedurfte und im Vergleiche mit der Zeit, die zur Erwärmung bis auf 100° nöthig war.

Regnault hat aus seinen umfassenden Versuchen über die Dampfwärme empirische Formeln abgeleitet für die Gesammtwärme λ, aus denen durch Subtraction der Flüssigkeitswärme q, die er ebenfalls in Formeln ausdrückte, die Dampfwärme $r = \lambda - b$ gefunden werden konnte. Er fand für

Wasser $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\,t$; $r = 606{,}5 - 0{,}605\,t - 0{,}00002\,t^2 - 0{,}0000003\,t^3$
Aether $\lambda = 94 + 0{,}045\,t - 0{,}00055556\,t^2$; $r = 94 - 0{,}07901\,t - 0{,}0008514\,t^2$
Chloroform $\lambda = 67 + 0{,}1375\,t$; $r = 67 - 0{,}09485\,t - 0{,}0000507\,t^2$.

Die große Dampfwärme des Wassers hat Anwendung zu der Dampfheizung, zum Erhitzen der Trockenwalzen, z. B. in Papierfabriken u. s. w. Bei der Dampfheizung wird der in einem tiefstehenden Kessel gebildete Dampf in Röhren unter den Fußböden hingeleitet, wo er durch Wärmeabgabe sich condensirt und wegen der etwas schiefen Lage der Röhren wieder in den Kessel zurückkehrt.

420 **Die Verdunstungskälte.** Die Eismaschine (Harrison 1856). Auch wenn eine Flüssigkeit bei niedriger Temperatur allmälig durch Verdunstung in Dampf verwandelt wird, verbraucht dieselbe Wärme; ja die Dampfwärme ist bei niedriger Temperatur sogar größer als bei hoher; so ist die Dampfwärme des Wassers bei 0° = 606°, bei 10° = 596°, bei 20° = 592°, aber bei 100° nur 536°. Wenn demnach eine Flüssigkeit verdunstet, so wird derselben Wärme entzogen, sie wird abgekühlt, es entsteht Verdunstungskälte. Diese Verdunstungskälte ist um so stärker, je rascher die Verdunstung geschieht, je größer also die Oberfläche der verdunstenden Flüssigkeit, je luftleerer der Dunstraum und je flüchtiger die Flüssigkeit ist.

Der Wärmeverlust bei der Verdunstung entsteht dadurch, daß mehrere Moleküle der Flüssigkeit stoßend auf ein Oberflächenmolekül einwirken, wodurch sie ihre lebendige Kraft theilweise an dasselbe abgeben und dadurch Wärme verlieren. Das getroffene Molekül fliegt in den Luftraum hinaus und wird so ein Dampfmolekül. Trifft es auf Luftmoleküle, so wird es von diesen zur Flüssigkeit zurückgeworfen und gibt hierdurch seine Wärme zurück. Hierdurch folgt einfach, warum die Verdunstungskälte mit der Leere des Dunstraumes wächst. Flüchtigere Flüssigkeiten verdunsten rascher, können daher trotz geringerer Dampfwärme größere Verdunstungskälte erzeugen; so spürt man starke Kälte, wenn man die Hände mit Aether befeuchtet, obwohl die Dampfwärme des Aethers bei 10° nur 94° beträgt. — Auf der Verdunstungskälte beruht theilweise die Abkühlung der Luft durch Regen, die Beständigkeit der Körpertemperatur des Menschen, indem mit steigender Temperatur die Ausdünstung durch die Haut zunimmt, das Gefühl der Kälte bei Benetzung der Haut, das Verfahren, Gefäße durch nasse, umgeschlagene Tücher kühl zu halten. Die Spanier halten in porösen Thongefäßen, Alkarazzas genannt, Flüssigkeiten kühl; in Indien bringt man in porösen Schalen unter heiterem, kühlem Morgenhimmel Wasser zum Gefrieren. Benetzt man die mit Baumwolle umwundene Kugel eines Thermometers mit Aether oder schwefliger Säure und schwingt sie schnell durch die Luft, so kann man sie zum Gefrieren bringen. Wollastons Kryophor (1813) besteht aus zwei luftleeren Glaskugeln, die durch eine Glasröhre verbunden sind und von denen eine etwas Wasser enthält; bringt man die andere in eine Kältemischung, so gefriert das Wasser in der ersten. Durch starke Compression mittels des Natterer'schen Apparates entstandenes flüssiges Kohlendioxyd verdampft mit ungeheurer Raschheit und entzieht dadurch dem übrigen Kohlendioxyd soviel Wärme, daß dasselbe zu Schnee erstarrt. — Unter der Luftpumpe kann man Wasser zum Erstarren bringen, indem man ein Schälchen mit Schwefelsäure neben dasselbe stellt, das die Wasserdünste absorbirt; bei Anwendung von Schwefelkohlenstoff erstarrt sogar Quecksilber. Die höchste Kälte wurde von Faraday durch Mischung von Kohlendioxydschnee und

Aether unter der Luftpumpenglocke erzeugt; Natterer brachte durch Anwendung von flüssigem Stickstoffoxydul und Schwefelkohlenstoff sogar eine Kälte von 140° hervor. In allen diesen Fällen werden sehr rasch verdunstende Stoffe angewendet, deren Dämpfe durch die Luftpumpe gleich wieder entfernt oder durch die Schwefelsäure aufgesaugt werden, wodurch ununterbrochenes Verdunsten und daher starke Verdunstungskälte stattfindet. — Bei den neuen, großartigen Versuchen von Cailletet und von Pictet (in den letzten Wochen von 1877) über die Condensation der permanenten Gase (425.) strömte flüssiger Wasserstoff in die freie Luft und fiel in Form von Hagelkörnern zu Boden; hierbei war gewiß eine Verdunstungskälte von mehreren Hunderten von Graden entstanden.

Dasselbe Princip hat eine sehr wichtige Anwendung in der **Eismaschine** gefunden. Harrison in Neu-Holland benutzte zuerst (1856) zur Construction einer solchen die Verdunstungskälte des Aethers. Eine verbesserte Harrison'sche Eismaschine von Siebe in Berlin erregte auf der Londoner Ausstellung (1862) großes Aufsehen. Die Maschine besteht aus dem Aetherkessel oder Congelator, einer durch eine Dampfmaschine getriebenen Luftpumpe und einem Condensator. Der Congelator ist ein mit concentrirter Kochsalzlösung gefüllter Kessel, in welchem ein System kupferner am Ende mit einander verbundener Röhren liegt. In diesen Röhren wird der Aether zum Verdampfen gebracht, die Aetherdämpfe werden durch die Luftpumpe in den Condensator geführt, dort zu Flüssigkeiten condensirt und wieder in den Aetherkessel zurückgeführt. Hier wird durch die beschleunigte Verdunstung die Salzlösung auf eine sehr niedrige Temperatur (bis — 15°) gebracht, und durch Anspritzen eines Strahles dieser kalten Lösung auf Kästen von Zinkblech, die mit Wasser gefüllt sind, wird dieses zum Gefrieren gezwungen. — Carré hat eine größere Anzahl von Eismaschinenconstructionen seit 1866 ausgeführt. In seinen Aethereismaschinen enthält der Congelator eine größere Anzahl von Zellen, die mit conischen den Aether enthaltenden Gefäßen umgeben sind, und in welchen andere mit Wasser gefüllte Zellen eingesetzt werden, so daß hier das Eis sogleich im Congelator entsteht. Zu einer anderen Construction hat Carré Ammoniak verwendet und sowohl intermittirende Apparate für den Hausgebrauch, als auch continuirliche zum Fabrikbetrieb erbaut. Bei einer dritten Construction wird die Luft aus einem halb mit Schwefelsäure gefüllten Kessel fortgepumpt, wodurch das Wasser in einer mit dem Kesselraume verbundenen Flasche zum raschen Verdampfen und dadurch zum Gefrieren gebracht wird. Kirk (1863) benutzte die Ausdehnungskälte der Luft zur Construction einer Eismaschine; der Haupttheil derselben ist ein Cylinder, in welchem die verdichtete Luft ihre Wärme an Kühlwasser am einen Ende des Cylinders abgibt, während die verdünnte Luft am anderen Ende einer Chlorcalciumlösung ihre Wärme entzieht. Carré's größte continuirliche Maschine, welche 30 000 Frcs. Anschaffungskosten und nur wenig Unterhaltungskosten erfordert, liefert per Stunde 200kg Eis; ein intermittirender Apparat, der bei einer Operation 1kg Eis liefert, kostet 282 Frcs.; die Schwefelsäure-Apparate kosten 120—1200 Frcs. und liefern per Stunde bis 100kg Eis.

421 **Der Leidenfrost'sche Tropfen** (1765). **Der sphäroidale Zustand** (Boutigny 1840). In allzu heißen Gefäßen sieden Flüssigkeiten nicht, weil sich zwischen ihnen und der heißen Gefäßwand eine Dampfschicht bildet, welche die Wärme schlecht leitet, und welche die Flüssigkeit trägt; diese nimmt daher wie jede unabhängige Flüssigkeit Kugelform an, tanzt vom Dampfe abgestoßen, auf dem Gefäße umher, verdampft wegen der geringen Menge durch den Dampf zugeleiteter Wärme nur langsam und zerspringt endlich, wenn unscheinbar klein geworden, mit einem lauten Knalle. Leidenfrost beobachtete die Erscheinung zuerst an Wassertropfen auf glühendem Metallbleche, Boutigny untersuchte dieselbe nach vielen Richtungen und glaubte in derselben einen vierten Aggregatzustand, den sphäroidalen Zustand zu erkennen; diese Benennung ist für die Zusammenfassung aller hierher gehörigen Erscheinungen gebräuchlich geworden, obwohl Boutignys vierter Zustand keine Annahme gefunden hat. Kühlt sich das Gefäß unter eine gewisse Grenztemperatur ab, so geräth die Flüssigkeit in ein zischendes und herumsprühendes Sieden. Diese Grenztemperatur ist um so niedriger, je tiefer der Siedepunkt der Flüssigkeit liegt; sie beträgt nach Boutigny für Wasser 171°, für Alkohol 134°, für Aether 61°. Indessen ist auch der Stoff der heißen Unterlage von Einfluß; am leichtesten gelingen die Versuche mit glühenden Metallschalen oder auf oxydfreien geschmolzenen Metallmassen, schwieriger in Glas- oder Porzellangefäßen; Aether, Brom, Schwefelkohlenstoff bilden selbst auf heißem Wasser, Wasser auf Terpentinöl Leidenfrost'sche Tropfen, Aether

auch auf heißem Sande; dagegen auf weißglühender Kreide, Holzkohle, rostigem Eisen ist kein Sphäroid zu Stande zu bringen (Berger 1863). Die Temperatur der Flüssigkeit des Tropfens liegt immer unter dem Siedepunkte, je nach dem Stadium der Erscheinung mehr oder weniger weit von demselben entfernt; nach Emsmann kann sie um so niedriger sein, je höher das Gefäß erhitzt ist. Nicht blos leicht verdampfende, sondern alle flüssigen Körper, ja sogar manche schmelzbaren oder dampfbildenden, feuchten festen Körper nehmen nach Berger den sphäroidalen Zustand in dem Sinne an, daß sie durch ihre Dampfhülle von der glühenden Unterlage getrennt werden und mit großer Geschwindigkeit rotiren, selbst Wismuth, Blei und Zinn rotiren in Tropfenform auf glühend fließendem Eisen. Hierdurch mag es sich erklären, daß man ungestraft die Hand in glühend geschmolzenes, reines Metall tauchen kann; hierin liegt wohl die Erklärung gelungener Feuerproben.

Manche sehen den Grund des Leidenfrost'schen Tropfens in der abstoßenden Kraft der Wärme, Andere darin, daß die Hitze die Adhäsion verkleinere, und daß die hierdurch überwiegende Cohäsion die Benetzung verhindere und die Tropfenform erzeuge, wie sie mit Wasser auf fettem Glas und Quecksilber auf Holz entsteht. Daß zwischen dem Sphäroid und der Unterlage keine Berührung stattfindet, hat Poggendorff durch einen Versuch nachgewiesen; um eine Magnetnadel ging der Draht eines elektrischen Stromes zu dem glühenden Gefäße, während der andere in die Flüssigkeit tauchte; sowie dieselbe sphäroidal wurde, hörte die Wirkung des elektrischen Stromes auf die Nadel auf. Tyndall erzeugte auf dem Gipfel einer convexen Schale einen sphäroidalen Tintentropfen und konnte zwischen diesem und der Unterlage hindurch einen glühenden Draht sehen oder einen grellen Streifen des Lichtes einer elektrischen Lampe, welche hinter dem Apparat aufgestellt war. Wenn durch diese Versuche festgestellt ist, daß der Tropfen die Schale nicht berührt, so bleibt nur noch zu zeigen, daß derselbe von Dampf getragen wird; dies scheint durch Versuche Buddes (1871) dargethan, nach welchen unter der Luftpumpenglocke schon bei 80—90° Leidenfrost'sche Wassertropfen entstehen, weil alsdann der Dampf nur den Tropfen, nicht aber auch den Luftdruck zu tragen hat.

Ueber den sphäroidalen Zustand gibt es eine große Zahl interessanter Versuche. An der umgekehrten glühenden silbernen Schale laufen aus einem Schwamm gepreßte Wassertropfen wie glänzende feste Perlen herab. — Ruht der Tropfen auf einer ziemlich ebenen Fläche, so wird das Entweichen des Zwischendampfes gestört; er geht dann durch den Tropfen und entweicht häufig rythmisch an den Seiten, wodurch derselbe Rosettenform annimmt; die igelartige Sternform großer Tropfen ist nach Berger eine Interferenz von Wellen, die durch aufsteigende heißere und sinkende kühlere Wassertheilchen entstehen. — Da die Temperatur des Tropfens immer unter dem Siedepunkte liegt, so hat condensirtes Schwefeldioxyd in dem glühenden Platintiegel eine Temperatur unter —10°; träufelt man Wasser auf diesen Tropfen, so gefriert dasselbe, und kann man demnach aus dem glühenden Platintiegel Eisstücke herausholen. Ja sogar Quecksilber kann man nach Faraday zum Gefrieren in einem glühenden Platintiegel bringen, indem man in demselben ein Gemenge von Aether und Kohlendioxydschnee in den späroidalen Zustaud bringt und dann in den Tropfen einen zweiten kleineren Tiegel voll Quecksilber eintaucht; aus der Flamme der Aetherdämpfe kann man bald festes Quecksilber heben. -- Ein Stückchen Kohlendioxydschnee kann man auf die Zunge nehmen, ohne von der furchtbaren Kälte von 80° einen Nachtheil zu verspüren, weil der Schnee in sphäroidalen Zustand gelangend die Zunge nicht berührt, während man sich durch Zerdrücken dieses Schnees stark die Finger verbrennt. — Wenn von Tropfen die Rede ist, so darf man sich nicht Kügelchen von der Größe eines Regentropfens vorstellen, sondern auch bedeutend größere Massen; Berger gelang es, ein Pfund Wasser in eine Leidenfrost'sche Kugel zu verwandeln. Die Temperatur des Tropfens war unter dem Siedepunkte, aber nicht weit von demselben entfernt; nach Boutigny ist sie für Wasser zwischen 70 und 100°, für Alkohol zwischen 69 und 78°. — In dem sphäroidalen Zustande wird von Manchen eine Ursache von Kesselexplosionen vermuthet. Steht nämlich die Dampfmaschine still, so wird kein Wasser mehr in den Kessel gepumpt, aber das Entstehen und Ausströmen von Dampf findet noch statt; hierdurch werden die Kesselwände wasserfrei und bei fortdauernder Feuerung glühend. Beginnt nun mit dem Weiterarbeiten der Maschine die neue Wasserzufuhr, so ist dieses Wasser anfänglich in sphäroidalem Zustande, geräth aber bei allmäliger Abkühlung der Wände massenhaft ins Sieden. Man kann wirklich mit einem kleinen, glühenden, Wasser enthaltenden, zugekorkten Kupferkessel eine solche Explosion nachahmen. Indessen bestreitet Scheffler (1867) diese Erklärung, da das eingepumpte Wasser in einer für den sphäroidalen Zustand zu heftigen Bewegung sei.

422 Die Dampfmaschine (Papin 1690, Watt 1765).

Wollte man an dem Ruhme, die weltumgestaltende Dampfmaschine erfunden zu haben, auch diejenigen Theil nehmen lassen, welche zuerst durch Dampf Körper in Bewegung setzten, so hätten schon Archimedes (geb. 278 v. Chr.) und Heron (geb. 120 v. Chr.) das Recht genannt zu werden; denn der erstere hat nach Leonardo da Vinci eine Dampfkanone, der letztere Drehkugeln und Drehmännchen erfunden, die durch ausströmenden Dampf nach dem Princip des Segner'schen Wasserrades, also durch Dampfreaction bewegt wurden. Sieht man aber das wesentliche Element der Dampfmaschine in dem hohlen Dampfcylinder, in welchem der Dampf einen Kolben fortschiebt, so gebührt Denis Papin (1647 bis 1710) die Ehre des Erfinders. Die Idee seiner Maschine ist aus Fig. 227 zu erkennen. Das Wasser in dem Gefäße wird durch eine um dasselbe spielende Flamme in Dampf verwandelt, dieser hebt durch seine Spannung den Kolben p und wird dann durch Eintauchen des Gefäßes in kaltes Wasser condensirt; auf diese Weise wird unter dem Kolben ein leerer Raum erzeugt, so daß der äußere Luftdruck den Kolben zurückschieben muß. Dieser Gedanke war in der atmosphärischen Maschine von Newcomen (1705) verwirklicht, die bis in unser Jahrhundert in zahlreichen Exemplaren zum Wasserheben benutzt wurde. Der Kolben hing durch Ketten an dem einen Ende eines horizontalen Wagebalkens (Balancier), der an seinem anderen Ende die schweren Pumpengestänge trug; diese Gestänge zogen durch ihr Gewicht den Kolben aufwärts und der Raum hinter demselben füllte sich mit Dampf. Nach Condensation desselben durch auf den Cylinder fließendes Wasser wurde der Kolben durch den Luftdruck hinabgeschoben und so das Gestänge gehoben; es war also hier der Luftdruck die eigentlich wirksame Kraft, und der Dampf diente nur zur Erzeugung des leeren Raumes. Eine durch Zufall aufgefundene Verbesserung erhielt die Maschine 1712 dadurch, daß die Condensation durch eingespritztes Wasser geschah, das durch Oeffnen eines Hahnes in den Cylinder zugelassen wurde. Zur Bedienung dieses und des Dampfhahnes, der die Verbindung des Cylinders mit dem Dampfkessel her- und abstellte, war ein Knabe Humphrey Potter, angestellt, der sein Amt 1713 durch Schnüre dem Balancier übertrug und so die selbstthätige Steuerung erfand. Indessen wurde erst durch James Watt (1736—1819) die Dampfmaschine zu ihrer welthistorischen Bedeutung erhoben; 1765 verlegte er die Condensation in ein vom Cylinder getrenntes Gefäß, den Condensator, aus welchem die gelöste Luft und das überschüssige Wasser durch eine am Balancier hängende Luftpumpe fortgeschafft wurde. 1769 verbesserte er den Kolben und umgab den Cylinder mit einem den Wärmeverlust hemmenden Mantel; 1774 ließ er den Dampf zu beiden Seiten des Kolbens eintreten, statt der kalten Luft, benutzte so zuerst die Dampfspannung als bewegende Kraft und bahnte den Weg für die Hochdruckmaschine, die durch Dampf von hoher Spannung bewegt wird und deren Grundgedanke schon 1725 von dem deutschen Mechaniker Leupold veröffentlicht worden war. 1782— erfand Watt das Parallelogramm zur Geradführung der Kolbenstange, die Verwandlung der hin- und hergehenden Bewegung des Balanciers in die drehende Bewegung der Welle mittels Schubstange und Kurbel, die Beseitigung der Ungleichmäßigkeit der Drehung durch das Schwungrad und das Centrifugalpendel zur Regulirung des Dampfzuflusses; so war die Watt'sche Niederdruckmaschine vollendet.

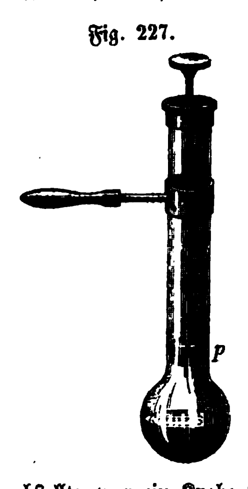


Fig. 227.

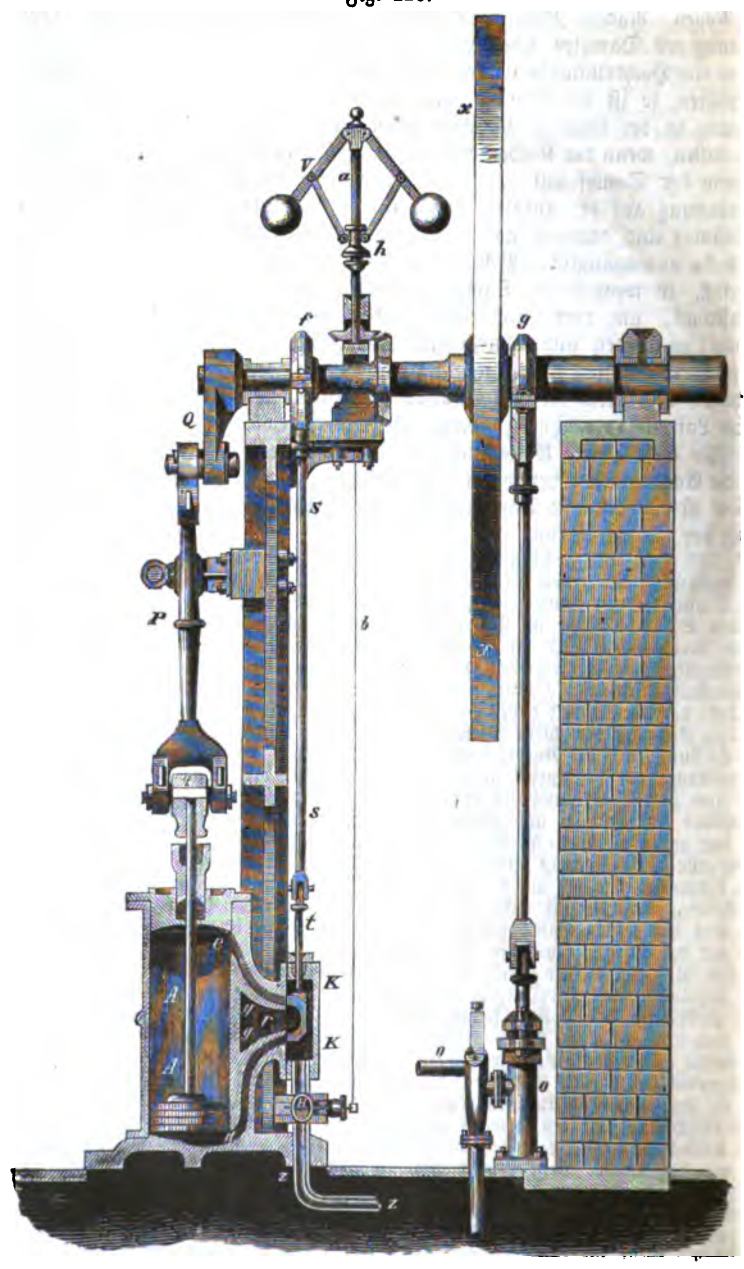
Viel einfacher ist die Hochdruckmaschine, welche 1795 von Olivier Evans in Nordamerika eingeführt wurde, der auch die schon 1784 von Hornblower angewandte Expansion in die Hochdruckmaschine aufnahm. Fulton in Amerika benutzte 1807 die Dampfmaschine zum regelmäßigen Betrieb einer Dampfschifffahrt zwischen New-York und Albany, und Robert Stephenson baute 1829 die erste Locomotive zu der ersten Dampf-Eisenbahnfahrt von Liverpool nach Manchester am 6. October 1829.

423 Die Hochdruckmaschine. Das wesentlichste Element der gewöhnlichen Dampfmaschine ist der Cylinder, ein hohles, oben und unten geschlossenes, cylindrisches Gefäß, in welchem eine dicke, kreisförmige Scheibe, der Kolben, genau an die Innenfläche sich anschließt. Der Dampf tritt abwechselnd zu beiden Seiten des Kolbens in den Cylinder ein und bewegt durch seine Spannung den Kolben abwechselnd vom Boden bis zum Deckel und wieder vom Deckel bis zum Boden. Diese hin- und hergehende Bewegung des Kolbens wird gewöhnlich in die drehende

wegung einer Welle verwandelt, weil eine solche drehende Bewegung sich leicht durch Rollen, Räder, Hebel auf andere Maschinen übertragen läßt. Geht die Spannung des Dampfes über zwei Atmosphären hinaus, so wird die Dampfmaschine eine Hochdruckmaschine genannt; erreicht die Dampfspannung höchstens zwei Atmosphären, so ist die Maschine eine Niederdruckmaschine. Wegen der geringen Spannung in der letzteren Maschine kann dieselbe nur dann eine nennenswerthe Arbeit leisten, wenn der Kolben und der Cylinder einen großen Durchmesser haben, und wenn der Dampf auf der einen Seite des Kolbens condensirt wird, so daß die Spannung auf der anderen Seite einer fast vollständigen Luftleere sich gegenüber befindet und demnach nahezu mit ihrem vollen Betrage wirken kann. Demnach ist ein unumgänglicher Bestandtheil einer Niederdruckmaschine der Condensator, ein Gefäß, in welches der Dampf von der nicht wirksamen Seite des Cylinders her einströmt, um dort durch einspritzendes kaltes Wasser condensirt, in Wasser verwandelt zu werden und dadurch seine Spannung sofort auf Null herabzubringen. Für das Herbeischaffen des kalten Wassers ist eine Kaltwasserpumpe und für das Fortschaffen des durch die Condensation erwärmten Wassers und der Condensatorluft eine Luftpumpe nöthig, zu deren Bewegung gewöhnlich der Balancier benutzt wird. Alle diese Theile können bei Hochdruckmaschinen wegfallen, obschon auch bei diesen die Condensation verwendet werden kann. Die Hochdruckmaschine ohne Condensation ist die einfachste Dampfmaschine und daher am geeignetsten für das Verständniß der Dampfwirkung.

Fig. 229 stellt eine Hochdruckmaschine von vorn gesehen (in der Vorderansicht), Fig. 228 ine Seitenansicht mit einem Längenschnitte durch den Cylinder A vor, so daß man den olben C und die mit demselben fest verbundene Kolbenstange, die luftdicht durch die genannte Stopfbüchse im Cylinderdeckel geht, wahrnehmen kann. Die Kolbenstange reift an ihrem oberen Ende in das Gelenk der Schubstange P, welche abermals durch in Zapfengelenk mit der Kurbel Q verbunden ist, die fest auf der Welle R sitzt. Geht ie Kolbenstange hinauf, so muß auch die Schubstange dieselbe Bewegung machen; das ere Ende derselben drückt daher das eine Kurbelende nach oben und dreht dasselbe, da s andere Ende an der Welle befestigt ist, mit dieser um die Achse derselben bis in seine chste Stellung, wo die Kurbel senkrecht über der Welle steht. In diesem Moment steht e Schubstange vor der Kurbel in gleicher Richtung mit derselben; obwohl gleichzeitig der lben seine höchste Stellung hat und daher seinen Niedergang beginnt, so kann die hierch mittels Kolbenstange und Schubstange auf die Kurbel ausgeübte Zugkraft doch die rbel nur gegen die Welle pressen, aber nicht weiter drehen; diese Stellung der Maschine ist der erste todte Punkt derselben. Für die Ueberwindung desselben ist das Schwungad X bestimmt, das fest auf der Welle sitzend und mit derselben sich drehend eine gesse lebendige Kraft in sich aufnimmt und vermöge derselben die Welle und dadurch die rbel über den todten Punkt hinaus dreht. Nun macht die Schubstange wieder einen nkel mit der Kurbel, kann also bei ihrem Niedergange durch Zug dieselbe drehen, bis Kolben in seiner tiefsten Stellung und damit das freie Kurbelende in seinem tiefsten nkte angelangt ist. Hier liegen Schubstange und Kurbel wieder in einer Richtung; wohl gleichzeitig der Kolben seinen Aufgang beginnt, so könnte die Schubstange die rbel doch nur gegen die Welle pressen, nicht aber drehen, wenn nicht das Schwungrad Maschine auch über diesen zweiten todten Punkt hinzöge. Außer dieser Wirkung des wungrades hat dasselbe auch noch die Bestimmung, durch sein großes Beharrungsveren die Ungleichmäßigkeiten im Gange der Maschine auszugleichen, die durch die verdene Geschwindigkeit des Kolbens und durch die ungleiche Einwirkung der Schubstange die Kurbel entstehen, welch letztere in der verschiedenen Größe des Winkels der Schubge mit der Kurbel ihren Grund hat. Größere Unregelmäßigkeiten, welche aus der selnden Größe der von der Maschine zu überwindenden Arbeiten oder von der Verenheit der Dampfbildung im Kessel herrühren, werden gewöhnlich durch den Centugalregulator V mittels der Drosselklappe H in dem Dampfzuflußrohre z eglichen. Geht die Maschine zu schnell, so hebt die Schwungkraft der Kugeln das ück h und hiermit den einen Arm eines Winkelhebels, dessen anderer Arm dann die durch das Zuflußrohr gehende Klappe H mehr senkrecht zu demselben stellt und so den pfzufluß mindert. Bei Verzögerung des Ganges bringt das Gewicht der Schwungln die umgekehrte Wirkung hervor. Da das obere Ende der Schubstange nicht blos

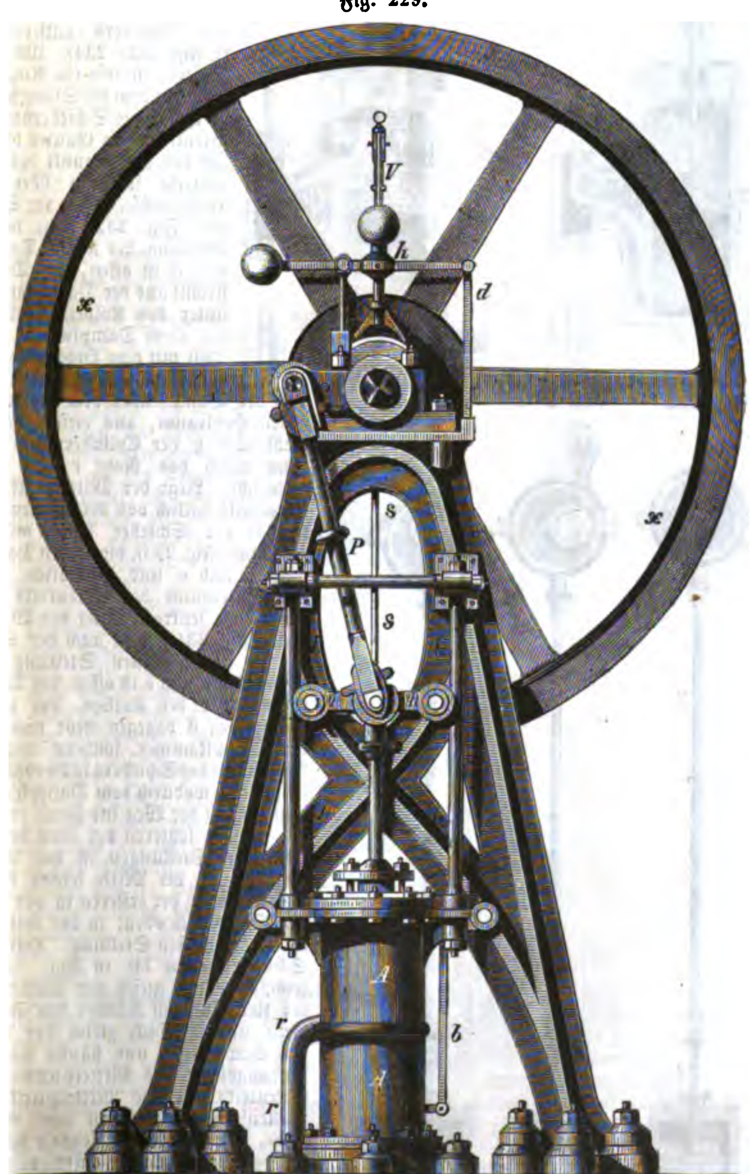
Fig. 228.



eine auf- und niedergehende, sondern auch eine seitliche, horizontale Bewegung hat, müßte auch das untere Ende und hiermit auch die Kolbenstange eine horizontal hin- hergehende Bewegung haben, wodurch die Stopfbüchse zerstört würde, wenn nicht durch sogenannte **Geradführung** die horizontale Bewegung beseitigt wäre. Die Geradführung

sind sehr mannigfaltig; in unserer Figur trägt die Kolbenstange ein Querhaupt q, das durch zwei Rollen sich zwischen den Leitstangen *l* immer in derselben Richtung erhält und dadurch auch der Kolbenstange ihre verticale Richtung sichert. Demselben Zwecke dient bei

Fig. 229.



r Niederdruckmaschine das Watt'sche Parallelogramm. — Es ist nun noch das wichtigste d interessanteste Nebenelement der Dampfmaschine, die selbstthätige Steuerung, der tige Zu- und Abfluß des Dampfes zu betrachten. Demselben dienen (Fig. 228) die ampfwege d, e, g und r, die Dampfkammer K und der in derselben sichtbare muschel-

förmige **Schieber**, der mittels der Stangen s und t durch das **Excentrik** f bewegt wird. Dasselbe ist eine massive Scheibe, die so auf der Hauptwelle sitzt, daß ihr Mittelpunkt nicht in die Achse der Welle fällt, sondern von demselben um die halbe Hubhöhe des Schiebers entfernt ist (s. Fig. 232—234). Um diese Scheibe ist lose ein Ring gelegt, mit dem die Steuerstange s, die an die Schieberstange t gelenkt ist, ein Ganzes bildet. Ist der Mittelpunkt des Excentriks senkrecht über der Wellenachse, so hat der Schieber (Fig. 232) seine höchste Stellung, der untere Dampfweg d ist offen, der Dampf strömt aus der Dampfkammer unter den Kolben, während der obere Dampfweg e (Fig. 230) mit dem Hohlraume des Schiebers communicirt, so daß der Dampf über dem Kolben in diesen Hohlraum, aus diesem in den Hohlraum g der Cylinderwand und dann durch das Rohr r ins Freie entweicht. Liegt der Mittelpunkt des Excentriks seitlich von der Wellenachse, so hat der Schieber seine mittlere Stellung (Fig. 233), die beiden Dampfwege d und e sind geschlossen. Hat der Mittelpunkt des Excentriks seine tiefste Lage senkrecht unter der Wellenachse (Fig. 234), so ist auch der Schieber in seiner tiefsten Stellung, der obere Dampfweg e ist offen, der Dampf strömt über den Kolben, der untere Dampfweg d dagegen steht nicht mit der Dampfkammer, sondern mit dem Hohlraume des Schiebers in Verbindung (Fig. 231), wodurch dem Dampfe unter dem Kolben der Weg ins Freie eröffnet ist. In der letzteren der eben betrachteten drei Stellungen ist der Kolben ungefähr in der Mitte seines Weges nach unten, in der ersteren in der Mitte des Weges nach oben; in der mittleren in seiner höchsten Stellung. Hätte der Schieber genau die in Fig. 228 gezeichnete Länge gleich der Entfernung der zwei äußeren Ränder der Dampfwege, und die Dicke gleich der Breite der Dampfwege, und stände die Verbindungslinie des Mittelpunktes des Excentriks mit dem Mittelpunkte des Wellenschnittes senkrecht zur Kurbellänge, wie es die drei letzten Figuren angeben, so würde die mittlere Schieberstellung beide Dampfwege gleichzeitig und zur Zeit des tiefsten oder höchsten Kolbenstandes [illegible] Beim tiefsten Kolbenstande (Fig. [illegible] wäre dann der untere Dampfweg [illegible]

Fig. 230. Fig. 231.

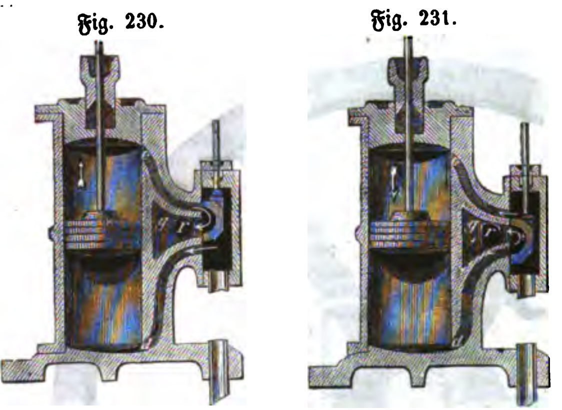


Fig. 232. Fig. 233. Fig. 234.



nicht geöffnet, und nach einer geringen Hebung des Kolbens mittels des Schwungrades würde dieser Dampfweg nur noch sehr wenig geöffnet sein, nur wenig Dampf könnte einströmen und könnte nur mit geringer Kraft wirken; ebenso wäre der obere Dampfweg nur wenig nach der Schieberhöhlung geöffnet, nur wenig Dampf würde über dem Kolben abfließen, und der Kolben hätte bei seinem Hube fast die ganze Spannung des Dampfes zu überwinden. Um diese Nachtheile zu beseitigen, wird das Voreilen des Schiebers angewendet; das Excentrik macht etwas mehr als einen rechten Winkel mit der Kurbel; der Ueberschuß wird Voreilungswinkel genannt. Hierdurch ist der untere Dampfkanal schon geöffnet, ehe der Kolben seinen tiefsten Punkt erreicht hat, so daß schon vor dem tiefsten Stande Dampf unter den Kolben strömt. Dies hat nicht blos den Vortheil, daß beim Steigen des Kolbens der Dampf sogleich eine starke Wirkung auf denselben ausübt, sondern daß auch in dem letzten Stadium des Nieherganges die Geschwindigkeit des Kolbens ein wenig durch den Gegendampf, wie durch ein elastisches Kissen gemäßigt wird, wodurch der Gang der Dampfmaschine ein so ruhiger, geschmeidiger ist und einen sehr vortheilhaften Gegensatz bildet zu dem gewaltsamen Hin- und Herwerfen des Kolbens in den calorischen und Gasmotoren. Das Voreilen für die Einströmung beträgt etwa $^1/_{100}$ des Schieberweges; damit das Voreilen für die Ausströmung noch etwas größer sei, macht man den Hohlraum des Schiebers etwas länger als die Entfernung der inneren Ränder der Dampfwege; hierdurch, sowie durch das Voreilen überhaupt wird der obere Dampfweg auch schon vor dem tiefsten Kolbenstande geschlossen. Dies hat aber einen großen Vortheil; besonders wenn es schon in $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges geschieht, weil dann mit einer 4, 3, 2mal kleineren Dampfmenge eine nicht viel kleinere Arbeit erzielt wird.

Maschinen, welche diese vortheilhafte Einrichtung haben, daß der Dampfzufluß schon nach einem Theile des Kolbenweges abgesperrt wird, heißen Expansionsmaschinen, weil in ihnen der Dampf hinter dem Kolben sich vermöge seiner Ausdehnsamkeit oder Expansibilität fortwährend ausdehnt und so mit wenn auch immer kleiner werdender Spannung auf den Kolben wirkt. Der Mechanismus, der die Abschließung des Dampfzuflusses bewirkt, ist sehr verschieden; der einfachste besteht in einem größeren Voreilungswinkel verbunden mit Ueberdeckungsrändern des Schiebers nach außen und nach der Höhlung zu; in einer anderen Einrichtung ist das Excentrik unrund und bewegt so den Schieber ruckweise in die nothwendigen Stellungen; Saulnier brachte über der ersten Dampfkammer noch eine zweite an und ließ durch ein zweites Excentrik in derselben einen eigenen Expansionsschieber hin- und hergehen; Mayer in Mühlhausen brachte zwischen den zwei Dampfkammern ein Ventil an, das durch einen auf der Schwungradwelle sitzenden unrunden Kegel geschlossen wird und demnach die Expansion nach dem Bedürfniß der Maschine regelt. Maschinen, in welchen der Dampf nach $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges abgeschlossen wird, heißen Maschinen mit 4, 3, 2facher Expansion.

Den Effect der Dampfmaschine berechnet man, indem man den Druck auf den Kolben mit dem Kolbenwege in 1 Sec. multiplicirt und mit 75 dividirt. Der Druck auf den Kolben wird mittels des Manometers berechnet; ist die Spannung $= p^{at}$ und die Kolbenfläche $= q^{qcm}$, so ist der Druck $= pq \cdot 1{,}0328^{kg}$. Der Kolbenweg in 1 Sec. ist $= nh:60$, wenn h die Hubhöhe und n die Zahl der Kolbenspiele in 1 Min. beträgt. Die Hindernisse und die Bewegung der Dampfmaschinentheile verzehren einen Theil des Effectes, so daß der Nutzeffect nur 0,5 bis 0,7 des theoretischen Effectes beträgt. Viel geringer noch, nur wenige Procente, ist der Nutzeffect im Verhältnisse zu der in der erzeugten Wärme enthaltenen Arbeit; die besten Cornischen Maschinen geben nur 14%. — Den Effect der Expansionsmaschine kann man ungefähr berechnen, indem man den Kolbenhub während der Expansion in mehrere Theile zerlegt, die Spannungen in diesen Theilen nach dem Mariotte'schen Gesetze berechnet, mit den betreffenden Hubtheilen multiplicirt und die Producte addirt. (S. Aufg. 674.)

Die Locomotive. Unter den unzähligen Anwendungen der Dampfmaschine nimmt die Locomotive die erste Stelle ein. Da bei dieser ebenso wenig wie bei der Schiffsmaschine ein großes Schwungrad angebracht werden kann, so wendet man in beiden Fällen zwei Dampfmaschinen an, welche aber beide auf eine Welle, die Welle der beiden großen Triebräder (Schaufelräder) in der Weise einwirken, daß die eine Maschine in ihrem Kraftpunkte, in der günstigsten Stellung sich befindet, wenn die andere ihren todten Punkt durchläuft, was ganz einfach dadurch bewerkstelligt wird, daß die zwei Kurbelrichtungen senkrecht aufeinander stehen. Fig. 235 stellt eine Crampton'sche Locomotive dar; C ist ein Cylinder, die Kolbenstange bewegt sich links durch ein Querhaupt gerade zwischen zwei Gleitschienen und setzt rechts die Speisepumpe p in Wirkung, die mittels des Rohres rr Wasser aus dem Tender saugt. Die Kolbenstange wirkt in der oben beschriebenen Weise mittels der in der Figur sichtbaren Schubstange und Kurbel auf die Welle, auf der die zwei großen Triebräder fest sitzen, und auf welcher mittels besonders sorgfältig construirter Lagerbüchsen

424

förmige Schieber, der mittels der Stangen s und t durch das Excentrik f bewegt wird. Dasselbe ist eine massive Scheibe, die so auf der Hauptwelle sitzt, daß ihr Mittelpunkt nicht in die Achse der Welle fällt, sondern von derselben um die halbe Hubhöhe des Schiebers entfernt ist (s. Fig. 232—234). Um diese Scheibe ist lose ein Ring gelegt, mit dem die Steuerstange s, die an die Schieberstange t gelenkt ist, ein Ganzes bildet. Ist der Mittelpunkt des Excentriks senkrecht über der Wellenachse, so hat der Schieber (Fig. 232) seine höchste Stellung, der untere Dampfweg d ist offen, der Dampf strömt aus der Dampfkammer unter den Kolben, während der obere Dampfweg e (Fig. 230) mit dem Hohlraume des Schiebers communicirt, so daß der Dampf über dem Kolben in diesen Hohlraum, aus diesem in den Hohlraum g der Cylinderwand und dann durch das Rohr r ins Freie entweicht. Liegt der Mittelpunkt des Excentriks seitlich von der Wellenachse, so hat der Schieber seine mittlere Stellung (Fig. 233), die beiden Dampfwege d und e sind geschlossen. Hat der Mittelpunkt des Excentriks seine tiefste Lage senkrecht unter der Wellenachse (Fig. 234), so ist auch der Schieber in seiner tiefsten Stellung, der obere Dampfweg e ist offen, der Dampf strömt über den Kolben, der untere Dampfweg d dagegen steht nicht mit der Dampfkammer, sondern mit dem Hohlraume des Schiebers in Verbindung (Fig. 231), wodurch dem Dampfe unter dem Kolben der Weg ins Freie eröffnet ist. In der letzteren der eben betrachteten drei Stellungen ist der Kolben ungefähr in der Mitte seines Weges nach unten, in der ersteren in der Mitte des Weges nach oben; in der mittleren in seiner höchsten Stellung. Hätte der Schieber genau die in Fig. 228 gezeichnete Länge gleich der Entfernung der zwei äußeren Ränder der Dampfwege, und die Dicke gleich der Breite der Dampfwege, und stände die Verbindungslinie des Mittelpunktes des Excentriks mit dem Mittelpunkte des Wellenschnittes senkrecht zur Kurbellänge, wie es die drei letzten Figuren angeben, so würde die mittlere Schieberstellung beide Dampfwege gleichzeitig und zur Zeit des tiefsten und höchsten Kolbenstandes verschließen. Beim tiefsten Kolbenstande (Fig. [illegible]) wäre dann der untere Dampfweg und

Fig. 230. Fig. 231.

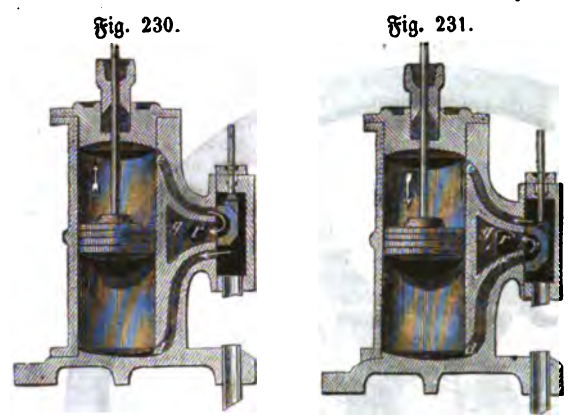


Fig. 232. Fig. 233. Fig. 234.



nicht geöffnet, und nach einer geringen Hebung des Kolbens mittels des Schwungrades würde dieser Dampfweg nur noch sehr wenig geöffnet sein, nur wenig Dampf könnte einströmen und könnte nur mit geringer Kraft wirken; ebenso wäre der obere Dampfweg nur wenig nach der Schieberhöhlung geöffnet, nur wenig Dampf würde über dem Kolben abfließen, und der Kolben hätte bei seinem Hube fast die ganze Spannung des Dampfes zu überwinden. Um diese Nachtheile zu beseitigen, wird das Voreilen des Schiebers angewendet; das Excentrik macht etwas mehr als einen rechten Winkel mit der Kurbel; der Ueberschuß wird Voreilungswinkel genannt. Hierdurch ist der untere Dampfkanal schon geöffnet, ehe der Kolben seinen tiefsten Punkt erreicht hat, so daß schon vor dem tiefsten Stande Dampf unter den Kolben strömt. Dies hat nicht blos den Vortheil, daß beim Steigen des Kolbens der Dampf sogleich eine starke Wirkung auf denselben ausübt, sondern daß auch in dem letzten Stadium des Niederganges die Geschwindigkeit des Kolbens ein wenig durch den Gegendampf, wie durch ein elastisches Kissen gemäßigt wird, wodurch der Gang der Dampfmaschine ein so ruhiger, geschmeidiger ist und einen sehr vortheilhaften Gegensatz bildet zu dem gewaltsamen Hin- und Herwerfen des Kolbens in den calorischen und Gasmotoren. Das Voreilen für die Einströmung beträgt etwa $^1/_{100}$ des Schieberweges; damit das Voreilen für die Ausströmung noch etwas größer sei, macht man den Hohlraum des Schiebers etwas länger als die Entfernung der inneren Ränder der Dampfwege; hierdurch, sowie durch das Voreilen überhaupt wird der obere Dampfweg auch schon vor dem tiefsten Kolbenstande geschlossen. Dies hat aber einen großen Vortheil; besonders wenn es schon in $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges geschieht, weil dann mit einer 4, 3, 2 mal kleineren Dampfmenge eine nicht viel kleinere Arbeit erzielt wird.

Maschinen, welche diese vortheilhafte Einrichtung haben, daß der Dampfzufluß schon nach einem Theile des Kolbenweges abgesperrt wird, heißen **Expansionsmaschinen**, weil in ihnen der Dampf hinter dem Kolben sich vermöge seiner Ausdehnsamkeit oder Expansibilität fortwährend ausdehnt und so mit wenn auch immer kleiner werdender Spannung auf den Kolben wirkt. Der Mechanismus, der die Abschließung des Dampfzuflusses bewirkt, ist sehr verschieden; der einfachste besteht in einem größeren Voreilungswinkel verbunden mit Ueberdeckungsrändern des Schiebers nach außen und nach der Höhlung zu; in einer anderen Einrichtung ist das Excentrik unrund und bewegt so den Schieber ruckweise in die nothwendigen Stellungen; Saulnier brachte über der ersten Dampfkammer noch eine zweite an und ließ durch ein zweites Excentrik in derselben einen eigenen Expansionsschieber hin- und hergehen; Mayer in Mühlhausen brachte zwischen den zwei Dampfkammern ein Ventil an, das durch einen auf der Schwungradwelle sitzenden unrunden Kegel geschlossen wird und demnach die Expansion nach dem Bedürfniß der Maschine regelt. Maschinen, in welchen der Dampf nach $^1/_4$, $^1/_3$, $^1/_2$ des Kolbenweges abgeschlossen wird, heißen Maschinen mit 4, 3, 2facher Expansion.

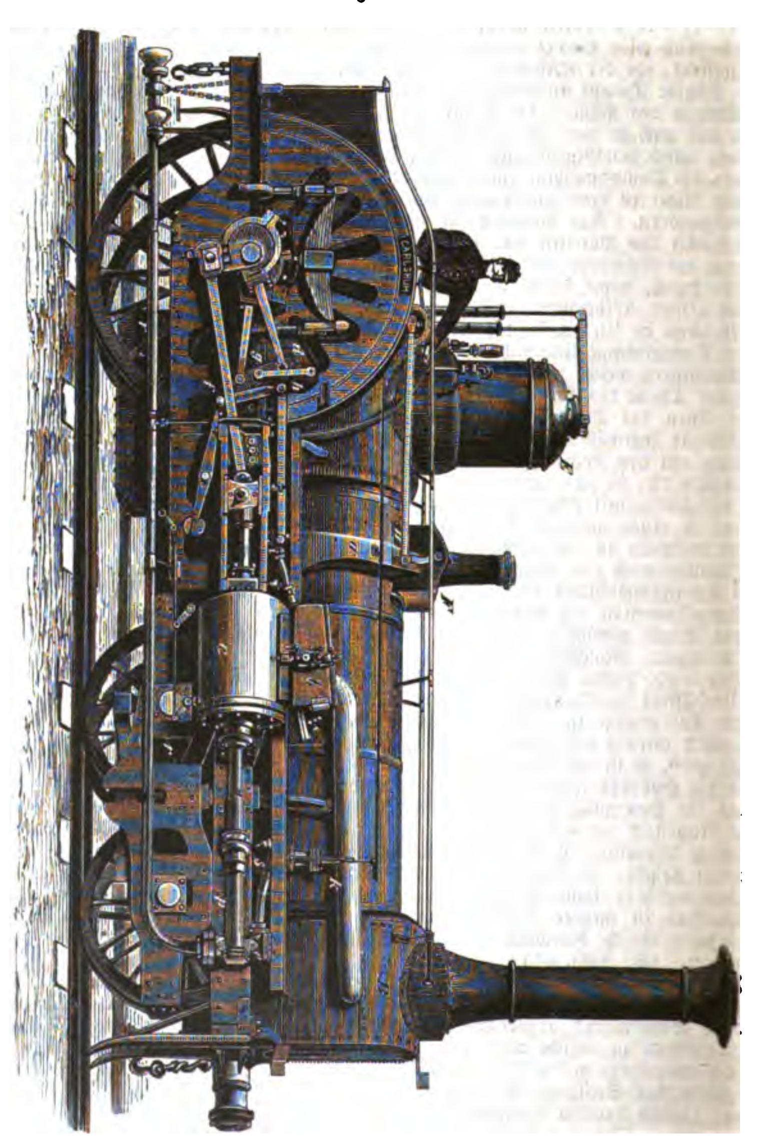
Den Effect der Dampfmaschine berechnet man, indem man den Druck auf den Kolben mit dem Kolbenwege in 1 Sec. multiplicirt und mit 75 dividirt. Der Druck auf den Kolben wird mittels des Manometers berechnet; ist die Spannung $= p^{at}$ und die Kolbenfläche $= q^{qcm}$, so ist der Druck $= pq \,.\, 1{,}0328^{kg}$. Der Kolbenweg in 1 Sec. ist $= nh:60$, wenn h die Hubhöhe und n die Zahl der Kolbenspiele in 1 Min. beträgt. Die Hindernisse und die Bewegung der Dampfmaschinentheile verzehren einen Theil des Effectes, so daß der Nutzeffect nur 0,5 bis 0,7 des theoretischen Effectes beträgt. Viel geringer noch, nur wenige Procente, ist der Nutzeffect im Verhältnisse zu der in der erzeugten Wärme enthaltenen Arbeit; die besten Cornischen Maschinen geben nur 14%. — Den Effect der Expansionsmaschine kann man ungefähr berechnen, indem man den Kolbenhub während der Expansion in mehrere Theile zerlegt, die Spannungen in diesen Theilen nach dem Mariotte'schen Gesetze berechnet, mit den betreffenden Hubtheilen multiplicirt und die Producte addirt. (S. Aufg. 674.)

424

Die Locomotive. Unter den unzähligen Anwendungen der Dampfmaschine nimmt die Locomotive die erste Stelle ein. Da bei dieser ebenso wenig wie bei der Schiffsmaschine ein großes Schwungrad angebracht werden kann, so wendet man in beiden Fällen zwei Dampfmaschinen an, welche aber beide auf eine Welle, die Welle der beiden großen Triebräder (Schaufelräder) in der Weise einwirken, daß die eine Maschine in ihrem Kraftpunkte, in der günstigsten Stellung sich befindet, wenn die andere ihren todten Punkt durchläuft, was ganz einfach dadurch bewerkstelligt wird, daß die zwei Kurbelrichtungen senkrecht aufeinander stehen. Fig. 235 stellt eine Crampton'sche Locomotive dar; C ist ein Cylinder, die Kolbenstange bewegt sich links durch ein Querhaupt gerade zwischen zwei Gleitschienen und setzt rechts die Speisepumpe p in Wirkung, die mittels des Rohres rr Wasser aus dem Tender saugt. Die Kolbenstange wirkt in der oben beschriebenen Weise mittels der in der Figur sichtbaren Schubstange und Kurbel auf die Welle, auf der die zwei großen Triebräder fest sitzen, und auf welcher mittels besonders sorgfältig construirter Lagerbüchsen

und mittels starker Federn der dicke eiserne, viereckige Rahmen ruht; dieser trägt alle übrigen Maschinentheile und überträgt so deren großes Gewicht auf die Räder, welche hierdurch eine so große Reibung gegen die Schienen ausüben, daß sie nicht schleifend auf denselben sich umdrehen, sondern wie Zahnräder in dieselben greifend sich fortbewegen; Berg-

Fig. 135.



locomotiven müssen zu dem Ende ein noch größeres Gewicht haben. Die Steuerung geschieht durch die gewöhnliche Schiebereinrichtung mit Excentrik; doch ist die Einrichtung zur Umsteuerung ausgebildet, so daß nach einem Stillstande der Locomotive die entgegengesetzte Richtung eingeschlagen werden kann, was einfach dadurch bewerkstelligt wird,

daß man den Kolben die entgegengesetzte Bewegung von derjenigen machen läßt, die er im Augenblicke vor dem Stillstande besaß; dann drehen sich auch die Kurbel und die Räder in umgekehrter Richtung. Die Kolbenbewegung wird aber dadurch gewechselt, daß man den Dampf auf der anderen Seite des Kolbens einströmen läßt, indem man den geöffneten Dampfweg schließt und den geschlossenen Dampfweg öffnet, also indem man den Schieber um seine ganze Weglänge verschiebt. Da das Excentrik sich nicht gleichzeitig mit in die entgegengesetzte Lage verschieben läßt, so sind zwei Excentriks direct neben einander auf der Welle so angebracht, daß ihre Excentricitäten um 180° gegen einander verschoben sind. Die beiden Stangen derselben sind an die beiden Enden der sogenannten Hängtasche oder Coulisse dg gelenkt, welche vom Locomotivführer mittels eines Hebelwerkes gehoben und gesenkt werden kann. Sie besteht aus zwei oben und unten verbundenen Eisenschienen, deren innere Seiten sehr glatt geschliffen sind, und welche zwischen sich das feste Ende der Schieberstangen als Gleitstück fassen. Ist dieses Gleitstück oben, so wird es durch das obere Excentrik hin- und herbewegt; wird aber die Coulisse durch den Locomotivführer gehoben, so gelangt das Gleitstück an das untere Ende der Coulisse und wird nun sammt der Schieberstange durch das untere Excentrik bewegt, sowie auch gleichzeitig, da die beiden Endpunkte der Coulisse ungleich weit von der Welle entfernt sind, um die Länge des Schieberweges verschoben.

Der **Dampfkessel**, welcher bei den stationären Dampfmaschinen gewöhnlich die Form eines beiderseits kugelförmig geschlossenen Cylinders besitzt und in einem Heerde von feuerfestem Mauerwerke mit sehr hohem Kamine einer großen Hitze ausgesetzt wird, muß bei der Locomotive ohne Mauerwerk, mit niedrigem Schornsteine und in kleinem Raume dennoch eine bedeutende Erhitzung zulassen. Diese Aufgabe ist durch den Röhrenkessel gelöst, der ein langes, cylindrisches, auf den Rahmen befestigtes, ringsum geschlossenes Gefäß ist, das von zahlreichen zur Cylinderachse parallelen Röhren durchzogen ist. Dieselben beginnen in der Hinterwand der Feuerbüchse, deren Wände doppelt sind und so Hohlräume bilden, die mit dem Kesselraume in unmittelbarem Zusammenhange stehen und daher mit Kesselwasser erfüllt sind; von dieser Hinterwand der Feuerbüchse ziehen die Rauchröhren durch den ganzen Cylinder bis in den am anderen Ende liegenden Kaminraum. Sie werden von den heißen Verbrennungsgasen durchzogen, sind von dem Kesselwasser umspült und bieten so demselben eine sehr große Heizfläche zur ausreichenden Bildung des Dampfes. Der Dampf strömt in dem wasserfreien, oberen Kesseltheile nach dem Dome oder der Dampfhaube E und vertheilt sich von da durch die Kanäle a nach den beiden Cylindern; der aus diesen strömende Dampf geht durch zwei im Kaminraume sich vereinigende Röhren zu dem Ausblaserohr, das sich stark verengert und daher den Dampf nöthigt, als stark gespannter Strahl durch den Schornstein zu entweichen; dieser Dampfstrahl reißt vermöge der saugenden Wirkung der Luftstrahlen die Kaminluft mit sich fort und bildet einen luftverdünnten Raum, so daß die Flammenluft der Feuerbüchse in die Rauchröhren gesaugt und durch die Roststäbe neue Außenluft in die Feuerbüchse gepreßt wird; demnach wird durch den ausströmenden Dampf der Zug erhalten, der bei den stationären Maschinen durch einen hohen Schornstein erwirkt werden muß; natürlich ist in Folge dessen der Rückdruck des abströmenden Dampfes größer als eine Atmosphäre, woraus sich die Nothwendigkeit eines hochgespannten Dampfes in der Locomotive ergibt. Daß die Locomotivmaschinen Hochdruckmaschinen sein müssen, ist indessen auch schon durch die Unmöglichkeit bedingt, Condensatoren und große Cylinder anzuwenden und große Wassermassen mitzuschleppen; in Dampfschiffen, wo diese Unmöglichkeit nicht vorliegt, werden deßhalb Niederdruckmaschinen mit Condensation verwendet. — An der Mündung des Dampfrohres in dem Dome ist entweder mittels eines Ventiles oder mittels einer durchlöcherten Scheibe, die von dem Locomotivführer durch einen Handgriff mehr oder weniger geschlossen werden können, für einen Regulator gesorgt, der sich in der Crampton'schen Locomotive bei u in dem Raume F befindet. Auf dem Dome sitzen Sicherheitsventile, deren Hebel nicht durch Gewichte, sondern durch Federwagen belastet sind, weil diese nicht so sehr wie jene durch die Fahrstöße erschüttert werden; dann befindet sich an demselben die Dampfpfeife (254.) und an der Vorderfläche der Feuerbüchse, leicht für den Führer sichtbar, Wasserstandszeiger und Manometer. Als selbstthätige Speisevorrichtung wandte man in letzter Zeit häufig Giffards Dampfstrahlpumpe an. — Die Crampton'sche Locomotive hat sehr große Triebräder und ein etwas unter der Maschine drehbares vierräderiges Vordergestell, wodurch sie einer größeren Geschwindigkeit selbst auf scharfen Bahnkrümmungen fähig ist.

4. **Die Condensation** (Faraday 1823—45, Andrews 1870). Dämpfe und **425** Gase werden condensirt, d. i. in Flüssigkeit verwandelt: 1. Durch Abkühlung: denn ein dampfgesättigter Raum enthält die größte Dampfmenge, die der Raum bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann; bei tieferer Temperatur kann

er nur eine geringere Dampfmenge enthalten, also muß ein Theil des gesättigten Dampfes condensirt werden. Enthält ein Raum überhitzten Dampf oder ein Gas, so enthält er nicht so viel Luftmasse, als er bei der betreffenden Temperatur fassen könnte; da aber durch Abkühlung eines Raumes die zu seiner Sättigung nöthige Dampfmenge immer kleiner wird, so kann auch jede beliebige Luftmenge zur Sättigung eines Raumes hinreichen, wenn nur die Abkühlung weit genug fortgesetzt wird. Jedes Gas wird also durch hinreichende Abkühlung zu gesättigtem Dampfe und dann durch weitere Abkühlung flüssig. 2. Durch Compression oder Zusammendrückung; denn ein gesättigter Dampf hat das Maximum der Dampfspannung, die bei der betreffenden Temperatur stattfinden kann; wird er bei gleichbleibender Temperatur comprimirt, so kann seine Spannung nicht zunehmen, ein Theil des Dampfes muß also flüssig werden. Ueberhitzter Dampf oder Gas hat bei derselben Temperatur nicht die höchste erreichbare Spannung; diese höchste Spannung wird aber nach Mariottes Gesetz durch Compression mehr oder weniger rasch erreicht. Durch Compression erreicht also ein Gas seine Maximalspannung und wird dann durch weitere Compression flüssig. 3. Durch Abkühlung und Compression. Damit die Voraussetzung der zweiten Methode, die gleichbleibende Temperatur erfüllt werde, muß mit der Compression Wärmeentziehung verbunden sein, weil durch die Compression Wärme entsteht. Außerdem wird bei der Condensation selbst ebenso viel Wärme erzeugt, als bei der Verdampfung verbraucht wird oder, wie die ältere Physik sagte, die latente Wärme des Dampfes wird bei der Condensation frei. Diese durch Condensation eines Theiles des Gases erzeugte Wärme hat die Wirkung, den anderen Theil gasförmig zu erhalten, wenn sie nicht durch Abkühlung soviel als möglich beseitigt wird. Weiter ist bei tieferer Temperatur die Maximalspannung eines gesättigten Dampfes kleiner als bei höherer, es bedarf demnach bei niederer Temperatur einer geringeren Compression, um die höchste Spannung zu erreichen; folglich führt die mit Abkühlung verbundene Compression zur Condensation. Endlich hat Andrews (1860—70) durch eingehende Versuche gezeigt, daß oberhalb einer gewissen Temperatur die Condensation durch Compression nicht eine gewöhnliche Flüssigkeit, sondern einen eigenthümlichen Zwischenzustand erzeugt, der einen allmäligen Uebergang des luftförmigen Zustandes zum flüssigen bildet; die Temperatur, von welcher an diese allmälige Condensation erfolgt, nennt Andrews den kritischen Punkt. Während unterhalb des kritischen Punktes ein plötzlicher Uebergang aus der Gasform in Flüssigkeit mit plötzlicher Volumverminderung erfolgt und darnach Flüssigkeit und Gas durch eine deutliche Grenzfläche getrennt erscheinen, ist oberhalb des kritischen Punktes der Uebergang mit ganz allmäliger Volumverminderung verbunden und ganz unmerkbar, und die erfolgte Condensation nur dadurch zu erkennen, daß bei plötzlicher Druckverkleinerung Aufbrausen erfolgt; nur in der Nähe des kritischen Punktes selbst zeigen sich schwankende, unstät sich bewegende Streifen in der Masse. Demnach ist gewöhnliche Condensation nur unterhalb des kritischen Punktes möglich, woraus abermals folgt, daß in vielen Fällen mit der Compression Abkühlung verbunden sein muß. — Unter einem bestimmten Drucke fällt die Temperatur der Condensation, der Condensationspunkt mit dem Siedepunkt der Flüssigkeit bei demselben Drucke zusammen; ebenso wird bei der Condensation eine ebenso große Wärmemenge erzeugt, als bei der Verdampfung verzehrt wird.

Die Condensation durch Abkühlung erklärt sich daraus, daß die Abkühlung in einer Verminderung der lebendigen Kraft der Moleküle besteht, wodurch die Anziehung allmälig so zur Geltung gelangen kann, daß die Moleküle in einer gewissen Lage festgehalten werden und nur um diese Lage hin- und herschwingen. Durch die Compression werden die Moleküle so sehr einander genähert, daß ebenfalls die Anziehung wieder zur Wirkung kommen kann, besonders wenn die durch die Compressionsarbeit den Molekülen mitgetheilte höhere

lebendige Kraft denselben durch Abkühlung wieder entzogen wird; ist aber die Temperatur während der Compression zu hoch, so kann die ohnedies große lebendige Kraft der Molecüle durch Mittheilung der Compressionsarbeit so gesteigert werden, daß sie trotz ihrer größeren Anziehung doch immer die Fähigkeit haben, sich von einander zu entfernen, wodurch sich der kritische Punkt und der Zwischenzustand von Andrews erklärt.

Die Condensation der Dämpfe durch Abkühlung geschieht gewöhnlich dadurch, daß dieselben in eine kalte Flüssigkeit, am besten kaltes Wasser, geleitet werden, oder daß Wasser in den Dampf eingespritzt wird, oder daß man den Dampf in vielfach gewundenen Schlangenröhren durch kaltes Wasser leitet (Oberflächencondensation in Seedampfschiffen). Befindet sich der in Verdichtung begriffene Dampf, wie z. B. Wasserdampf, in der Luft, so sind die einzelnen condensirten Theilchen durch Luft von einander getrennt und werden vom Auftriebe derselben getragen; sie nehmen daher Kugelgestalt, und, weil sie noch lufthaltig sind, die Form von Kugelbläschen an. Aus solchen Kugelbläschen bestehen die Hauchwölkchen vor unserem Munde bei kalter Witterung, der Schwaden über heißem oder kochendem Wasser, die Dampfsäule über Schloten und Kaminen, aber auch der Nebel und die Wolken des Himmels. Geschieht die Condensation fortdauernd an festen Körpern, so bedecken sich dieselben durch Vereinigung der Theilchen mit Tropfen, sie beschlagen oder bethauen, wie im Winter die Fenster der warmen Stuben, wie kalte Gegenstände, die in ein warmes Zimmer kommen, wie unter kühlem, heiterem Morgenhimmel die irdischen Gegenstände sich mit Thau bedecken. Man hat auch Gase, Schwefel- und Stickstoffdioxyd (SO_2 und NO_2), Cyan und Ammoniak durch Abkühlung allein flüssig gemacht, indem man das Gas durch eine U-förmig gebogene, an der Umbiegung einen Ballon tragende und in eine Kältemischung eingebettete Röhre streichen ließ; für die Condensation des Kohlendioxyds ist jedoch hier schon eine Kälte von 100° nöthig. Besser gelingt die Condensation der Gase durch Compression. Faraday benutzte auch hier eine zweischenkelige, aber zugeschmolzene und mit den Enden nach unten gerichtete, sehr starke Glasröhre; in das eine Ende wurde der gasentwickelnde Stoff, z. B. mit Ammoniak gesättigtes Chlorsilber gebracht und dieses Ende dann erwärmt, worauf das Ammoniak in den anderen Schenkel stieg und sich dort durch seinen eigenen Druck condensirte. Thilorier (1834) ersetzte die 2 Schenkel durch starke Gußeisengefäße, die durch schmiedeeiserne Bänder verstärkt waren; das eine enthielt doppelt kohlensaures Natrium und eine oben durchbohrte, mit Schwefelsäure gefüllte Röhre. Wurde dieses Gefäß, das durch Zapfen in Lagern hing, in Schwingungen versetzt, so floß die Schwefelsäure auf das Salz und machte das Kohlendioxyd frei, das dann durch eine Röhre in ein zweites, ganz gleiches Gefäß ging und sich dort durch eigenen Druck condensirte. Da aber dieser gefährliche Apparat schon manches Unglück veranlaßt hat, so ist jetzt der viel sicherere Apparat von Natterer (1844) zur Condensation des Kohlendioxyds (CO^2) und anderer Gase gebräuchlich. Derselbe besteht aus einer dickwandigen, schmiedeeisernen Flasche, die unten ein Druckventil und oben eine durch eine Schraube verschließbare Ausflußöffnung trägt und auf 150^{at} geprüft ist. Dieses Gefäß wird auf die obere Mündung einer starken Pumpe gesetzt, die durch Schwungrad, Kurbel und Kurbelstange bewegt wird und das Kohlendioxyd in das Gefäß preßt, während dasselbe noch mit einer Kältemischung umgeben ist. Läßt man dies flüssige Kohlendioxyd durch die Ausflußöffnung n ein weites Blechgefäß strömen, so erhält man in demselben durch die Verdunstungskälte ohlendioxydschnee, der gemischt mit Aether die strengste Kälte erzeugt. An freier Luft eigt der Kohlendioxydschnee eine Kälte von 70° und hält sich, da er ein schlechter Wärmeleiter t, Tagelang; er schmilzt bei —58°; demnach bietet das Kohlendioxyd die Sonderbarkeit, ß sein Schmelzpunkt höher liegt als sein Siedepunkt, denn flüssiges Kohlendioxyd siedet nter 1^{at} schon bei —80°. Die große Kälte bis zu —110°, die Faraday durch das er- wähnte Gemisch unter Anwendung der Luftpumpe erzeugen konnte, wurde von ihm zu eiter gehenden Condensationsversuchen benutzt, indem er die U-förmige Röhre in eine che Mischung bettete und mittels einer Druckpumpe Gase in dieselbe trieb; der zweite chenkel der Röhre war hierbei geschlossen und enthielt ein Manometer zum Messen des ruckes, unter welchem das einströmende Gas flüssig wurde. So fand Faraday, daß hlendioxyd unter 1,2^{at} bei —78°, unter 10^{at} bei —28°, unter 37^{at} bei —1° flüssig urde. Stickoxydulgas bedurfte bei dieser letzten Temp. 31^{at} und bei 1^{at} einer Kälte von °; Ölbildendes Gas wurde bei —73° erst unter Anwendung von 9^{at} flüssig und bedurfte i —1° eines Druckes von 42^{at}. — Bei solcher Anwendung von Druck und Kälte wider- nden der Condensation nur 6 Gase: Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenoxyd, umpfgas oder Methan CH_4 und Stickoxyd, welche also jetzt allein noch den Namen rmanente Gase verdienen. Diese 6 Gase gehören der unorganischen Natur an; unter n Producten der organischen Chemie sind indeß auch noch manche Gase, welche bisher nfalls als permanente bezeichnet werden mußten, so Acetylen C_2H_2, Aethan C_2H_6 u. A. rade bei diesen permanenten Gasen der organischen Chemie gelangten Versuche der

neuesten Zeit zuerst an das Ziel der Condensation, die dann auch bei den genannten jetzt durchgeführt wurde, so daß es genau genommen kein permanentes Gas mehr gibt. Cailletet in Chatillon-sur-Seine (1877) füllte die Gase in eine dickwandige, oben geschlossene Glasröhre, die mit ihrem unteren offenen Ende in Quecksilber tauchte, das einen starken Gußstahlcylinder erfüllte, und das durch eine starke, hydraulische Gußstahlpresse mittels Wasser in die Glasröhre gepreßt wurde. So wurde Acetylen bei 1° Temp. flüssig durch einen Druck von 48^{at}, bei höheren Temperaturen waren immer stärkere Pressungen nöthig, bei 31° endlich ein Druck von 103^{at}. Mittels derselben Methode gelang es, Stickoxyd, das bei + 8° noch unter 207^{at} gasförmig blieb, bei — 11° durch 104^{at} flüssig zu machen, so daß also der kritische Punkt dieses Gases zwischen + 8 und — 11° liegt. Das Sumpfgas zeigte bei 7° unter einem Drucke von 180^{at} Nebel, war also unter diesen Umständen ebenfalls condensirt; ähnliche Nebel erhielt Cailletet auch von O, H, Luft, CO und N. Dagegen ist es Pictet in Genf (1877) gelungen, diese Gase in Form flüssiger Strahlen mit festen Körnern untermischt darzustellen, jedoch noch nicht in Form von einige Zeit dauernder Flüssigkeit oder sichtbarer fester Massen, wie es bekanntlich bei Kohlendioxyd und Stickoxydul gelungen ist. Pictets Methode ist von besonderem Interesse. Er entwickelte O in einer starken, festen schmiedeeisernen Retorte durch Erhitzen großer Mengen von Kaliumchlorat und ließ das Gas erst ausströmen, als es eine Spannung von 500^{at} angenommen hatte; es strömte dann aber nicht direct in die freie Luft, sondern zuerst durch eine etwas geneigte meterlange Röhre, die in einer zweiten weiteren concentrisch sie umgebenden Röhre lag, welche mit flüssigem Kohlendioxyd erfüllt war. Durch eine Saugpumpe wurden die Dämpfe dieses flüssigen CO_2 immer fortgepumpt, so daß nach mehrstündigem Pumpen in dieser Röhre eine Kälte von — 140° stattfand. Das fortgepumpte gasförmige CO_2 wurde jedoch stets durch eine Druckpumpe in eine zweite Röhre gepreßt, welche ebenfalls in einer weiteren Röhre concentrisch lag, in der sich flüssiges Schwefeldioxyd SO_2 von 65° Kälte befand; hierdurch wurde CO_2 immer wieder flüssig und immer wieder in die erste Röhre hineingetrieben. Damit aber in der zweiten Röhre, die eigentlich den Proceß einleitet, die Temperatur des flüssigen SO_2 von — 65° fortdauernd erhalten blieb, wurden ganz wie bei der ersten Röhre die sich stets bildenden SO_2-Dämpfe durch eine Saugpumpe fortwährend weggepumpt und durch eine Druckpumpe in einem kühl gehaltenen Condensator zu Flüssigkeit condensirt, um dann wieder in die zweite Röhre getrieben zu werden. Die zweite Röhre erzeugte also durch flüssiges SO_2 eine Kälte von 65°, die zur Condensation von CO_2 benutzt wurde, das dann in der ersten Röhre eine Kälte von — 140° hervorbrachte, nachdem mittels einer Dampfmaschine von 15e das Pumpen stundenlang gewährt hatte. Durch diese erste Röhre strömte nun der unter 500^{at} stehende O, wurde schon durch die hier herrschende Kälte von — 140°, noch mehr aber durch seine eigene Ausdehnung auf die tiefste Temperatur gebracht, vielleicht noch unter — 200°, und strömte aus der Mündung derselben als ein weißer flüssiger Strahl, der von einer blauen Hülle von höchst dichtem O umgeben war. — Bei der Condensation von H wandte Pictet statt CO_2 flüssiges Stickoxydul an; der H wurde durch Einwirkung von Kali auf ameisensaures Kalium dargestellt, erreichte eine Spannung von 650^{at}, und strömte aus dem meterlangen Rohre mit einem Tone gleich dem einer Dampfpfeife aus. Der Strahl war auf eine Länge von 12^{cm} undurchsichtig, sonst stahlblau, und auf dem Boden hörte man ein Prasseln wie von fallenden Körnern. Offenbar war hier wie im Innern der Röhre der H gefroren.

426 Aufg. 634. Um wie viele Grade ist der Schmelzpunkt unter das arithmetische Mittel durch die Mischung erniedrigt bei 1 Zinn und 6 Blei, bei 1 Zinn und 1 Blei, bei 6 Zinn und 1 Blei? Aufl.: 46°, 91°, 50°. — A. 635. Black setzte eine gewisse Quantität Eis einer constanten Temperatur aus und beobachtete, daß sie 20 Min. Zeit zum Schmelzen, dann 25 Minuten bis zum Sieden und dann 134 Minuten zum Verkochen brauchte; was folgte hieraus für den Wärmeverbrauch beim Schmelzen und beim Sieden? Aufl.: Schmelzwärme = 80°, Dampfwärme = 536°. — A. 636. 2^{kg} Eis von 0° werden mit 5^{kg} Wasser von 90° gemischt und erzeugen die Mischtemperatur 41,6°; wie groß ist die Schmelzwärme des Eises? Aufl.: 79,4°. — A. 637. Welche Temperatur erhält 1^{kg} siedheißen Wassers durch Schmelzen von 1^{kg} Schnee von 0°? Aufl.: 20,75°. — A. 638. Wie viel kg Eis von 0° muß man zu 3^{kg} Wasser von 100° mischen, damit es bis zum Nullpunkte erkaltet? Aufl.: 300 = 79 x; hieraus x = $3,8^{kg}$. — A. 639. Wie viel Gramme Eis von 6° muß man zu 120^{g} Wasser von 80° mischen, damit das Gemisch sich um 60° abkühle? Aufl.: 72^{g}. — A. 640. Welche Temperatur nimmt ein Gemisch von 3^{kg} Wasser von 65° und 2^{kg} Schnee von 0° an? Aufl.: 7,3°C. — A. 641. Welche Arbeit wird bei der Schmelzung von 1^{kg} Eis verzehrt? Aufl.: $33\,602^{mk}$. — A. 642. Wie groß ist die bei der Erstarrung von Wasser stattfindende Volumvergrößerung oder Ausdehnung, wenn nach Bunsen (1870) das sp. G. des Eises = 0,91 674 beträgt? Aufl.: 1,09. — A. 643. Um wie viel nimmt das Volumen von 1^{l} Wasser beim Gefrieren zu? Aufl.: 90^{ccm}. — A. 644. Um wieviel wächst

das Eis aus dem 3cm weiten Halse einer gefüllten Literflasche heraus? Aufl.: 12,7cm. — A. 645. Welche Arbeit wird durch die Ausdehnung von 1kg Wasser beim Gefrieren in der Luft geleistet? Aufl.: pu = 10,328 . 0,09 = 9,295mk. — A. 646. Nach Schuhmacher und Moseley ist der lineare Ausdehnungs-Coëfficient des Eises = 0,00 005 142, also der cubische = 0,00 015 426; wird nun angenommen, daß die Erniedrigung des Gefrierpunktes durch Druck darin besteht, daß die Ausdehnung des Eises nicht bis zu 1,09, sondern nur um 0,00 015 426 weniger gestattet wird, so kann man die Frage lösen, durch welchen Druck der Gefrierpunkt um 1° niedriger wird, vorausgesetzt, daß man die Zusammendrückbarkeit des Eises kennt; es sei dieselbe z. B. 1 Milliontel durch 1at. Aufl.: So sind 154at nöthig. — A. 647. Wie viel Wasser erstarrt, wenn 6kg bis auf — 12° überkaltet sind, und wenn das Gefrieren durch einen Anstoß erfolgt? Aufl.: 0,9kg. — A. 648. Nach den Formeln von Magnus und von Regnault die Spannung von Wasserdampf von 110° zu berechnen und mit Taf. 414 zu vergleichen. Aufl.: Magnus ergibt 1077,2, Regnault 1085,3, die Tabelle 1075mm. — A. 649. Wie groß ist der Druck von Wasserdampf von 150° auf 1qm? Aufl.: 48 664kg. — A. 650. Von der Oberseite eines Dampfkessels geht ein Rohr nach außen tief herab; wie viel wird in diesem offenen Schenkel Wasser höher stehen als in dem geschlossenen, wenn die Kesseltemperatur 115° beträgt? Aufl.: 6,9m. — A. 651. Wie viel wird es in dem geschlossenen Schenkel höher stehen, wenn die Temp. auf 60° gesunken ist? Aufl.: 8,3m. — A. 652. Welchen Druck von außen hat ein Dampfkessel von 8qm Oberfläche zu tragen, wenn die Temperatur im Kessel auf 70° gesunken ist? Aufl.: 57 293kg. — A. 653. In der Formel (44) für das combinirte Mariotte- und Gay-Lussac'sche Gesetz ist die Constante $p_0 v_0 = 1,2077$; wie groß ist nach dieser Formel das Volumen v von 1cbm überhitzten Dampfes von 200° C. und 4at Spannung, und wie groß berechnet sich dasselbe Volumen nach Zeuners Formel, welche die Geltung jenes Gesetzes nicht voraussetzt? Aufl.: 0,5232 und 0,5164, eine starke Abweichung. — A. 654. Gesetzt, man schließe 1kg = 1,6504cbm gesättigten Wasserdampf von 200° vom Wasser ab und erwärme ihn bei gleichbleibendem Volumen auf 400°; welche Spannung wird er nach der früher fälschlich vorausgesetzten Geltung des M.-G.'schen Gesetzes und welche nach Zeuners Formel haben? Aufl.: 1,8 und 1,9at. — A. 655. Wie groß ist das Volumen von 1kg gesättigten Dampfes von 100°, wenn nach Zeuners Tabellen das Gewicht von 1cbm Dampf (die Dichtigkeit) = 0,6059kg beträgt? Aufl.: 1,6504cbm. — A. 656. Wie groß ist dies spec. Volumen bei 60°, bei 150°, bei 190°, wenn die betreffenden Dichtigkeiten 0,13, 2,6 und 6,4 betragen? Aufl.: 7,7cbm, 0,38cbm und 0,15cbm. — A. 657. Welchen Zusammenhang hat dieses spec. Volumen Zeuners mit dem älteren Begriffe des spec. Volum.? Aufl.: Das ältere spec. Vol. betrug 1700 für 100°, d. h. eine gewisse Dampfmenge von 100° nimmt einen 1700 mal größeren Raum ein als das Wasser von 0°, aus dem sie entstanden ist; 1kg Wasser von 0° hat 1cbdm Volumen; 1kg Dampf hat demnach 1700cbdm = 1,7cbm Vol., während das spec. Vol. Zeuners für dasselbe Dampfgewicht nur 1,6504cbm angibt; demnach sind die beiden Begriffe leicht zu vereinigen, nur sind die älteren Zahlen ungenau. — A. 658. Die Ungenauigkeit der älteren spec. Vol. rührte von der Annahme her, daß die Wasserdampfdichte für alle Temperaturen constant = 5/8 sei, und daß für gesättigten Dampf das M.-G.'sche Gesetz gelte; unter dieser Annahme das ältere spec. Vol. für 100° zu berechnen? Aufl.: 1l Luft von 100° wiegt 1,293 : (1 + 0,3665)g; 1l Dampf = 1,293 . 0,6235 : (1 + 0,3665)g; daher ist das Vol. von 1g Dampf von 100° = 1,3665 : 1,293 . 0,6235 = 1,695l = 1695ccm; 1g Wasser = 1ccm; daher das alte spec. Vol. = 1695. — A. 659. Das spec. Vol. für Dampf von 2at nach der älteren und der neueren Anschauung zu berechnen? Aufl.: 1kg Dampf = (1 + 0,003 665 . 121) : (1,293 . 2 . 0,6235) = 0,893cbm; 1kg Wasser = 0,001cbm; also das ältere spec. Vol. = 894. Das neuere = 1 : 1,1631 = 0,859cbm, also wieder eine starke Abweichung. Die Zahl 1,1631 ist nach Zeuners Tabellen das Gewicht von 1cbm Dampf. — A. 660. Das Gewicht von 1cbm Dampf von 100° und 120° nach der älteren Methode zu berechnen? Aufl.: 1cbm Luft von 100° wiegt 1,293 : (1 + 0,3665)kg = 0,9462kg, also 1cbm Dampf 0,5899kg. Für 121° muß auch noch der Spannungsunterschied berücksichtigt werden; 1cbm Dampf wiegt dann 1,293 . 0,6235 . 2 : (1 + 0,003 665 . 121) = 1,117kg, während Zeuners Tabellen 1,1631kg angeben. — A. 661. Die Dichte des Stickstoffoxydes theoretisch zu bestimmen? Aufl.: Dieses Gas besteht aus 1 Vol. N = 0,969 und 1 Vol. O = 1,108; daraus folgt 1 Vol. Gas = 1,0385, übereinstimmend mit Versuchen. — A. 662. Bei welcher Temperatur siedet Wasser unter 0,1at? Aufl.: 46,2° nach Tabelle 414. — A. 663. Nach der Formel von Magnus zu finden, bei welcher Temperatur Wasser unter einem Drucke von 100at sieden würde? Aufl.: 307°. — A. 664. Aus der Formel für barometrische Höhenmessung h = 18 404 (log b — log b′), worin b und b′ die Barometerstände am Fuße und auf der Höhe bedeuten, sowie nach Remys Regel (s. 418.) die Höhe eines Berges zu berechnen, an dessen Fuße das Wasser bei 99° und auf dessen Gipfel solches bei 91° siedet? Aufl.:

Nach Tabelle 414. entsprechen diesen Siedepunkten die Barometerstände 733,2 und 545,7, woraus nach der Formel $h = 2360^m$ und nach Kemps Regel 2328^m. — A. 665. Leitet man 3^{kg} Dampf von 100^0 in 150^{kg} Wasser von 20^0, so erwärmt sich das Ganze auf 32^0; wie groß ist die Dampfwärme des Wassers? Aufl.: $150 . 12 = 3 . x + 3 . 68$; hieraus $x = 532^c$. — A. 666. Man leitet 1^{kg} Aetherdampf von 35^0 durch ein Schlangenrohr, das in 10^{kg} Wasser von 10^0 liegt; der Aether fließt mit 35^0 ab, das Wasser steigt auf 19^0; wie groß ist die Dampfwärme des Aethers? Aufl.: 90^c. — A. 667. Welche Temperatur erhalten 100^{kg} Wasser von 10^0, wenn in dasselbe 4^{kg} Dampf von 120^0 geleitet werden? Aufl.: $35,1^0$. — A. 668. Welche mechanische Arbeit wäre nöthig, um 1^{kg} Wasser von 100^0 in Dampf von 100^0 zu verwandeln, falls diese Verwandlung durch solche Arbeit möglich wäre? Aufl.: $227\,476^{mk}$. — A. 669. Welche Arbeit entsteht, wenn 1^{kg} H und 8^{kg} O sich vereinigen, und wenn die Verbindung allmälig durch Abkühlung zu Eis wird? Aufl.: $(34\,000 + 9 . 636 + 9 . 80 - 93)\,424 = 17$ Mill. mk. — A. 670. Die äußere Dampfwärme des Wasserdampfes von 100^0 zu berechnen. Aufl.: $Apu = 10\,328 . 1,6504 : 424 = 40^c$. — A. 671. Die in 419. erwähnte wichtige Formel für die Dampfwärme der Volumeneinheit lautet $r = AT\,(dp : dt)$; die Bedeutungen von A und T sind bekannt: $(dp : dt)$ bedeutet den Differentialquotienten der Dampfspannung p in Bezug auf die Temperatur t, welcher nach Magnus Formel $p . 7,4475 . 234,69 : (234,69 + t)^2 . \log nat\, 10$ ist; wie groß ist hiernach die Dampfwärme des Wasserdampfes von 100^0? Aufl.: $dp : dt = 760 . 7,4475 . 234,69 . 2,3\,025\,851 : 343,69^2 = 27,305^{mm}$ Quecksilber $= 371,07^{kg}$ per 1^{qcm}; daher $r = 371,07 . 373 : 424 = 326^c$ für 1^{cbm} Dampf; da aber 1^{kg} Dampf $= 1,6504^{cbm}$, so ist r für $1^{kg} = 326 . 1,6504 = 538^c$. — Dieser Werth ist etwas zu groß; weil r eigentlich nicht für 1^{cbm} Dampf, sondern für die Differenz dieses 1^{cbm} Dampf und des entsprechenden Wasservolumens gilt; wird dies berücksichtigt, so ergibt sich genau 536. — A. 672. Der Kolbendurchmesser einer Hochdruckmaschine sei $= 48^{cm}$, die Hubhöhe des Kolbens in jeder Secunde $= 120^{cm}$, die Temperatur des Dampfes sei 130^0; wie groß ist der absolute Effect, der Nutzeffect, der Wasserbedarf und der Kohlenbedarf der Maschine, unter der allerdings ungenauen Voraussetzung, daß der gesättigte Dampf auch während der Arbeit dem Mariotte'schen Gesetze folge? Aufl.: Abs. Eff. $= 0,24^2 . 3,1416 . ((2030 - 760) : 760)\,10\,328 . 1,2 : 75 = 49,968^e$; Nutzeffect gewöhnlich $^1/_2$ des abs. Eff., also $= 24^e$; Dampfbedarf per Sec. $= 0,24^2 . 1,2 = 0,06\,812^{cbm}$ von 130^0; 1^{cbm} Dampf von 130^0 wiegt nach Zeuner $1,542^{kg}$, also Wasserbedarf per Sec. $= 0,06\,912 . 1,542 = 0,10\,658^{kg}$, also per Stunde $383,688^{kg}$. Kohlenbedarf: Dampfwärme von 1^{kg} Dampf von $130^0 = 646^c$, von $383,688^{kg} = 383,688 . 646^c$; 1^{kg} Kohle gibt 1200^c; daher Kohlenbedarf $= 383,688 . 646 : 1200 = 206,42^{kg}$. — A. 673. In einer Dampfmaschine mit Condensation sei die Dampftemperatur 108^0, der Kolbenradius 40^{cm}, der Kolbenhub 140^{cm}, die Zahl der Kolbenspiele per Minute 36; der Gegendruck im Condensator sei $0,1^{at}$; wie groß ist der absolute Effect? Aufl.: $0,4^2 . 3,1416\,((1005 - 760) : 760)\,10\,328 . (1,4 . 36 : 60) : 75 = 71,073^e$. — A. 674. Den Effect einer Expansionsmaschine unter den bekannten, sehr ungenauen Voraussetzungen der älteren Theorie annähernd zu berechnen, wenn die Expansion nach $^1/_4$ Kolbenhub beginnt, wenn der Ueberdruck 1^{at}, die Kolbenfläche $^1/_2{}^{qm}$, der Hub 1^m in 1 Sec. beträgt? Aufl.: Druck im ersten Hubviertel 1^{at}, im 2ten $(1 + {}^1/_2) : 2 = {}^3/_4{}^{at}$, im 3ten $({}^1/_2 + {}^1/_3) : 2 = {}^5/_{12}{}^{at}$, im 4ten $({}^1/_3 + {}^1/_4) : 2 = {}^7/_{24}{}^{at}$, zusammen $= {}^{61}/_{24}{}^{at}$, also im Mittel $= {}^{61}/_{96}{}^{at}$ $= \frac{1}{2} \cdot \frac{61}{96} \cdot 10\,328 = 3281^{kg}$, daher Effect $3281 . 1^{mk} =$ ca. 40^e.

5. Dritte Hauptwirkung der Wärme.

Die Erwärmung.

427 **Die specifische Wärme** (Wilcke 1772). Unter der spec. W. eines Körpers versteht man die Wärmemenge in Calorien ausgedrückt, welche einem Kilogramm des Körpers zugeführt werden muß, um seine Temperatur um 1^0 zu erhöhen. Da 1^c die zur Erwärmung von 1^{kg} Wasser um 1^0 nöthige Wärmemenge ist, so gibt die sp. W. auch an, wieviel mal soviel Wärme ein gewisses Gewicht eines Körpers zu einer bestimmten Temperaturerhöhung bedarf als ein gleiches Gewicht Wasser zu gleicher Erwärmung. Man stellt übrigens auch dieselbe Frage für gleiche Volumina auf und unterscheidet demnach die specifische Volumenwärme von der specifischen Gewichtwärme; doch versteht man unter sp. W. kurzweg immer die letztere.

Gemäß der neueren Wärmelehre ist die Temperatur bekanntlich nichts Anderes

als die lebendige Kraft der Moleküle und der Atome innerhalb der Moleküle. Da die Moleküle aus den Atomen bestehen, so führen die Atome auch die Bewegungen der Moleküle aus; demgemäß läßt sich auch kurz sagen: Die Temperatur ist die lebendige Kraft der Atome. In verschiedenen Körpern von gleicher Temperatur haben demnach die Atome eine gleiche lebendige Kraft; die Atome von geringerer Masse ersetzen dieselbe durch größere Geschwindigkeit. Demnach besteht auch die Temperaturerhöhung in einer Vermehrung der lebendigen Kraft der Atome, und eine Temperaturerhöhung um 1° ist in den verschiedensten Körpern eine gleiche Vermehrung der lebendigen Kraft der Atome. Beständen die Körper aus isolirten Atomen, die keine Wirkung auf einander ausüben, so würde in den verschiedensten Körpern für eine gleiche Temperaturerhöhung einer und derselben Anzahl von Atomen eine gleiche Wärmemenge erforderlich sein. Nun üben aber sowohl die Moleküle auf einander, als auch die Atome in den Molekülen auf einander eine anziehende Wirkung aus. Hierdurch wird der eben angeführte Schluß wesentlich geändert; denn die einem Körper zugeführte Wärme erhöht nicht blos die Temperatur, die lebendige Kraft der Atome, sondern sie entfernt auch die Moleküle weiter von einander, leistet also innere Arbeit der Moleküle, sie entfernt die Atome in den Molekülen weiter von einander, leistet dadurch innere Arbeit der Atome, und dehnt endlich den Körper aus, schiebt den äußeren Druck zurück, leistet also auch äußere Arbeit. Da nun die Anziehung und Entfernung der Atome und Moleküle in den verschiedenen Körpern verschieden ist, und auch die Ausdehnung durch die Wärme bekanntlich nicht dieselbe bei allen Körpern ist, so wird selbst bei einer gleichen Anzahl von Atomen verschiedener Körper durch eine und dieselbe zugeführte Wärmemenge eine verschiedene innere und äußere Arbeit geleistet, so daß eine verschiedene Wärmemenge zur Erhöhung der Temperatur übrig bleibt und daher eine verschiedene Erhöhung der Temperatur erfolgt. Umgekehrt, wenn eine gleiche Anzahl von Atomen verschiedener Körper dieselbe Temperaturerhöhung erfahren soll, so muß zwar für diese Erhöhung an sich eine gleiche Wärmemenge zugeführt werden, für die mit dieser Erhöhung aber unvermeidlich verbundene innere und äußere Arbeit muß, weil dieselbe für verschiedene Körper verschieden ist, eine verschiedene Wärmemenge zur Verwendung kommen. Da nun diese zwei für die Erhöhung der Temperatur und für die Arbeit nöthigen Wärmemengen noch nicht geschieden werden können, und da wir sonach gezwungen sind, in die zur Erwärmung nöthige Wärme diese beiden Wärmemengen einzubegreifen, so müssen wir auch die Folgerung zugestehen, daß zur Erwärmung gleicher Atomzahlen verschiedener Körper verschiedene Wärmemengen nöthig sind. Könnte man jedoch die für innere und äußere Arbeit nöthige Wärme aus der zugeführten nöthigen Wärme ausscheiden, so würde die eigentliche Erwärmungswärme, die ausschließlich zur Erhöhung der lebendigen Kraft der Atome erforderliche Wärme übrig bleiben, und diese müßte offenbar für eine gleiche Atomzahl verschiedener Körper dieselbe sein, weil eben für jedes isolirte Atom dieselbe Wärme zu gleicher Erwärmung nöthig ist. Die mechanische Wärmetheorie hat diese Wärme, die nur zur Erhöhung der lebendigen Kraft, also nur zur Erwärmung der Körper nöthig ist, in die theoretische Physik eingeführt. Rankine nennt sie die wahre sp. W., Clausius hat den Namen **Wärmecapacität**, der früher gleichbedeutend mit sp. W. gebraucht wurde, für dieselbe vorgeschlagen. Für dieselbe ergeben sich leicht folgende Sätze: Die Wärmecapacität der Atome verschiedener Körper ist dieselbe und constant; denn zu gleicher Erhöhung der lebendigen Kraft eines Atoms ist unter allen Umständen und Temperaturen, so lange das Atom isolirt bleibt, dieselbe Wärme nöthig. Die Wärmecapacität der Atomgewichte der Elemente ist gleich groß und constant; denn die Atomgewichte verschiedener Elemente enthalten

gleiche Atomzahlen, bedürfen daher auch, so lange die Atome als auf einander wirkungslos vorausgesetzt werden, gleicher Wärmemengen zu gleicher Temperaturerhöhung. Die Wärmecapacitäten von Molekülen, die gleich viele Atome enthalten, sind einander gleich, und sind gleich der Wärmecapacität eines Atoms, multiplicirt mit der Zahl der Atome; die Wärmecapacitäten von Molekulargewichten solcher Verbindungen, welche gleiche viele Atome in ihren Molekülen enthalten, sind gleich groß und werden erhalten, indem man die Wärmecapacitäten der Bestandtheile addirt. Die Wärmecapacitäten gleicher Gasvolume, deren Moleküle gleich viele Atome enthalten, sind einander gleich und constant; denn gleiche Gasvolume enthalten nach Avogadros Gesetz gleich viele Moleküle; bestehen nun in gleichen Volumen verschiedener Gase die Moleküle aus gleich vielen Atomen, so enthalten die Gasvolumina gleich viele Atome, bedürfen also auch gleicher Erwärmung zu gleicher Erhöhung ihrer lebendigen Atomkräfte. Diese und noch andere Sätze gelten nun zwar für die Wärmecapacität, also unter der Voraussetzung, daß weder innere Arbeit der Atome und Moleküle, noch äußere Arbeit stattfindet, nicht aber für die specifische Wärme, weil in diese alle zugeführte Wärme, also auch die für innere und äußere Arbeit verzehrte, einbegriffen ist; sie gelten jedoch für die specifische Wärme mit gewissen Annäherungen und Beschränkungen, die eben von der inneren und äußeren Arbeit herrühren, und in manchen Fällen stark, in anderen schwach auf die Geltung jener Gesetze für die sp. W. Einfluß üben. Sie nehmen für die sp. W. folgende Gestalt an:

428 1. Gesetz von Dulong und Petit (1818): Die specifischen Wärmen der Atomgewichte oder die Atomwärmen der Elemente sind nahezu einander gleich und zwar durchschnittlich gleich 6,4.

Solche Gewichtsmengen verschiedener Elemente, welche den Atomgewichten derselben proportional sind, enthalten nach dem Begriff der Atomgewichte gleich viele Atome, bedürfen daher, abgesehen von der inneren und äußeren Arbeit, zu gleicher Erwärmung einer und derselben Wärmemenge. Da jedoch zugeführte Wärme nicht blos erwärmt, sondern auch innere Arbeit der Atome und Moleküle leistet, welche bei verschiedenen Elementen verschieden sein muß, und außerdem die Elemente bei gleicher Erwärmung verschieden sich ausdehnt, also eine verschiedene äußere Arbeit leistet, so muß die Gleichheit der specifischen Wärmen der Atomgewichte gestört werden. Indessen ist die Hauptwirkung der zugeführten Wärme dennoch die Erwärmung, da die Ausdehnung z. B. bei der Erwärmung um 1° doch im Verhältnisse zu dieser Erwärmung gering, und daher, wie Buff (1872) speciell nachgewiesen hat, die innere und äußere Arbeit nicht bedeutend und ihre Verschiedenheit demnach noch weniger bedeutend ist; daher kann die Störung der Gleichheit der spec. W. der Atomgewichte der Elemente durch die Arbeit nur eine geringe sein. Multiplicirt man die Atomgewichte der verschiedenen Elemente mit den sp. W. derselben, wie es Dulong und Petit zuerst gethan, so entstehen Producte, die annähernd einander gleich und zwar durchschnittlich = 6,4 sind und die sp. W. der Atomgewichte angeben. Weil man früher hinter dieser annähernden eine absolute Gleichheit vermuthete, so wurden die Versuche zur Bestimmung der Atomgewichte und der sp. W. zahlreich wiederholt und die Methoden zu den höchsten Graden der Genauigkeit angespannt, jedoch ohne das Ziel zu erreichen; erst die mechanische Wärmetheorie zeigte die Unmöglichkeit der absoluten Gleichheit. Wäre die Gleichheit eine absolute, so könnte man für neue Elemente die sp. Wärme berechnen, indem man einfach das Product 6,4 durch das Atomgewicht zu dividiren hätte, oder man könnte das Atomgewicht berechnen, indem man das Product 6,4 durch die specifische Wärme dividirt. Bei dem Mangel der absoluten Gleichheit sind diese Rechnungen zwar nicht zulässig; sie gewähren jedoch häufig ein ganz sicheres Mittel, über das Atomgewicht eines Elementes Gewißheit zu erhalten, da man häufig im Zweifel ist, ob dasselbe wirklich gleich einer durch Versuche, z. B. durch die Dampfsdichte gefundenen Zahl oder gleich dem Zweifachen oder gleich der Hälfte derselben ist, worüber man jedenfalls durch die erwähnte Division Aufschluß erhält.

Indessen zeigt auch die annähernde Gleichheit der Atomwärmen der Elemente einige höchst auffällige und bisher unerklärliche Ausnahmen, nicht blos bei den Gasen, welche durchgängig eine viel niedrigere Atomwärme als die festen Elemente besitzen, und noch einer speciellen Betrachtung bedürfen, sondern auch bei drei festen Elementen, indem Kohlen-

stoff, Bor und Silicium nach allen älteren Bestimmungen eine viel kleinere Atomwärme als 6,4 haben, und zwar C unter verschiedenen Umständen 1—3, B etwa 4 und Si ca. 5. Kopp (1865) nimmt zur Erklärung dieser Abnormität seine Zuflucht zu dem schon oft vermutheten Urstoff oder zu mehreren Urstoffen, in welche die Atome der Elemente wohl noch zerlegbar sein dürften. Die Gleichheit der meisten festen Elemente in der erwähnten Beziehung scheine erklärlich, wenn deren Atome eine gleiche größere Anzahl, etwa 6, Urstoffatome enthielten, während das Si-Atom aus nur 5, das B-Atom aus 3, das C-Atom aus 2 solcher Urstoffatome gebildet wären und dadurch eine geringere Atomwärme besitzen müßten. Zu denselben Folgerungen gelangte in neuester Zeit H. F. Weber in Hohenheim. Derselbe hat schon (1872) gefunden, daß die verschiedenen Angaben über die Atomwärme des Kohlenstoffs davon herrühren, daß die Untersuchungen bei verschiedenen Temperaturen angestellt wurden, indem nach seinen Versuchen die sp. W. des Diamantes von 0 bis 200° sich auf die dreifache Größe steigere. Neuere Untersuchungen (1875) ergaben folgende merkwürdige Resultate: Wenn sich die Temperatur von —50 bis 600° erhöht, so steigt die sp. W. des Kohlenstoffs auf den 7fachen, die des Bors auf den 3fachen Betrag, und die des Siliciums zwischen —50 und 200° auf den zweifachen Betrag. Das Steigen wird jedoch gegen die erwähnten höchsten Temperaturen zu immer schwächer, und von diesen höchsten Temperaturen an bleibt die sp. W. nahezu constant. Diese constant bleibenden Endwerthe sind 0,46; 0,50; 0,205; multiplicirt man dieselben mit den betreffenden Atomgewichten 12, 11 und 28 der Elemente, so ergibt sich nahezu das Product 6. Die Atomwärme der drei abweichenden Elemente nähert sich also bei den höchsten Temperaturen der allgemeinen Atomwärme 6 aller festen Elemente, sie gelangen bei diesen Temperaturen ebenfalls in das Gültigkeitsbereich des Dulong-Petit'schen Gesetzes. Jedoch muß nach Weber das Gesetz in folgender Gestalt ausgesprochen werden: „Die specifischen Wärmen der festen Elemente variiren mit der Temperatur; für jedes Element gibt es aber einen Punkt T_0 in der Temperaturskala, von welchem an die Veränderlichkeit der sp. W. mit wachsender Temperatur T ganz unbedeutend wird. Das Product aus dem Atomgewicht in denjenigen Werth der spec. W., welcher den Temperaturen $T > T_0$ zukommt, liefert für alle festen Elemente einen nahezu constanten, zwischen 5,5 und 6,5 liegenden Werth." Da die innere Arbeit der Atome und Moleküle unmöglich die starke Veränderlichkeit der spec. W. des Kohlenstoffs bewirken kann, so ist nach Weber die Ursache dieser Veränderlichkeit innerhalb des Atoms zu suchen, was nur durch eine Veränderlichkeit in der Constitution des Atoms erklärlich scheint und offenbar auch eine „wechselnde Valenz" oder „Polyvalenz" des Kohlenstoffs wahrscheinlich macht.

Zu den abweichenden Elementen gehören auch die elementaren Gase, da dieselben im freien gasförmigen Zustande meist eine bedeutend geringere Atomwärme als 6 besitzen z. B. Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff zwischen 2 und 3, wenn sie keine äußere Arbeit leisten, und selbst wenn diese hinzugerechnet wird, höchstens 3—4. Diese Abweichung ist ebenfalls nicht durch innere Arbeit erklärbar, da eine innere Arbeit der Moleküle bei den Gasen nicht angenommen werden kann, weil dieselben sich nicht mehr anziehen, und da die innere Arbeit der Atome unmöglich den großen Unterschied erzeugen kann. Die meisten elementaren Gase haben indeß nach Kopp im festen Zustande z. B. Chlor im Kochsalz, Stickstoff im Salmiak, wie man leicht nach Gesetz 2. berechnen kann, die Atomwärme 6; Sauerstoff und Wasserstoff dagegen bleiben auch hierin abweichend; ihre Atomwärme in festen Verbindungen ergibt sich nur = 4 und 3.

Da die Atomwärme 6,4 der festen Elemente ein Maß ist für die lebendige Kraft, die einem Atom für die Erwärmung um 1° zugeführt werden muß, und da diese lebendige Kraft nur durch die Arbeiten verändert wird, so muß sie auch in Verbindungen constant bleiben und kann in denselben höchstens durch Veränderungen der Arbeit kleine Abweichungen annehmen. Die festen Elemente treten also mit ungeänderten Atomwärmen in die Verbindungen ein (Kopp 1865). Dieser dem Gesetze von Dulong und Petit entsprechende Satz ist die Grundlage des Neumann'schen Gesetzes. Die abweichenden Elemente Kohlenstoff, Bor und Silicium behalten nach Weber (1875) ihre Abweichungen auch in den Verbindungen. Die gasförmigen Elemente behalten nach Kopp die oben angegebenen Atomwärmen des freien Zustandes in allen festen Verbindungen, weichen also hierdurch auch von dem Kopp'schen Grundsatze ab.

2. Gesetz von Neumann (1831). Die Molekulargewichte der festen chemischen Verbindungen, deren Moleküle aus einer gleichen Anzahl von Atomen zusammengesetzt sind, haben annähernd gleiche specifische Wärme. Berücksichtigt man die Abweichungen der Elemente von Gesetz 1., so sind die Molekularwärmen der festen chemischen Verbindungen gleich den Summen der Atomwärmen ihrer Ele-

mente; bei den Verbindungen der dem Gesetz 1. folgenden Elemente sind die Molekularwärmen annähernd gleich dem so Vielfachen der Atomwärme 6,4, als das Molekül Atome enthält (Kopp 1865). Die sp. W. der Legirungen sind gleich dem Mittel der sp. W. der Bestandtheile (Regnault 1841).

Die Molekulargewichte der Verbindungen sind die Gewichte gleicher Anzahlen von Molekülen; sind nun in den verschiedenen Molekülen gleich viele Atome, so enthalten auch die Molekulargewichte gleich viele Atome, bedürfen daher abgesehen von der inneren und äußeren Arbeit zu gleicher Erwärmung einer gleichen Wärmezufuhr. Wird aber, wie es bei der sp. W. der Fall ist, hiervon nicht abgesehen, so ist aus denselben Gründen wie bei den Elementen, die innere und äußere Arbeit bei gleicher Temperaturerhöhung verschieden, wodurch die Gleichheit der sp. W. gestört wird. Neumann fand das Gesetz zunächst für Oxyde von den Formen RO und R^2O^3, für Schwefelmetalle von der Form RS, für kohlensaure und schwefelsaure Salze der Basis RO; doch fand er, wie jetzt erklärlich ist, keine absolute Gleichheit. Auch ergab sich für die Basen RO nicht das Zweifache und für die Basen R^2O^3 nicht das Fünffache der Atomwärme 6,4, einfach deßhalb, weil für den Sauerstoff das Gesetz 1. nicht gilt. Die noch zahlreicheren Untersuchungen von Regnault und Kopp bestätigten das Neumann'sche Gesetz. Kopp machte insbesondere darauf aufmerksam, daß für die Verbindungen der Elemente, die dem Dulong-Petit'schen Gesetze folgen, die Molekularwärme sich einfach aus der Atomwärme berechnen läßt, indem man diese mit der Zahl der Atome multiplicirt, und daß die so berechneten Molekularwärmen nicht weit von den Versuchsresultaten abweichen. So haben die zweiatomigen Schwefel- und Chlorverbindungen meistens die Molekularwärme 12, die dreiatomigen 18 u. s. w.; meistens sind hier wie auch in den folgenden Gesetzen die Versuchsresultate kleiner als die Resultate der Rechnung, was darauf hinweist, daß die innere Arbeit bei den Verbindungen kleiner als bei den Elementen ist, daß also, wie schon erwähnt, verschiedene Atome und Moleküle sich schwächer anziehen als gleiche, und wodurch sich erklärt, daß das Neumann'sche Gesetz durchgängig genauer gilt als das von Dulong und Petit. Natürlich darf man die eben angegebene Methode nicht für die Verbindungen der abnormen Elemente anwenden; führt man jedoch die abnorme Atomwärme derselben in die Rechnung ein, so stimmen die Resultate wieder nahe mit denen der Experimente. So ergibt sich für Verbindungen von der Form RO, wenn wir für O die durchschnittliche Atomwärme 4 setzen, durch Rechnung die Molekularwärme 10, für R^2O^3 erfolgt 24, Zahlen, von denen die Versuchsresultate nicht erheblich abweichen. Selbst für sehr complicirte Verbindungen gelten die beiden Methoden; so hat Kryolith ($AlNa_3Fl_6$) die Molekularwärme 50, nur wenig kleiner als die berechnete 60, Feldspath 105, nur wenig kleiner als die berechnete 118.

Aus dem Neumann'schen Gesetze folgt, daß man die Atomwärme und daher die sp. W. eines elementaren oder zusammengesetzten Bestandtheiles aus den Atomwärmen einer Verbindung und der übrigen Bestandtheile nahezu berechnen kann: subtrahirt man die Atomwärme dieser Bestandtheile von der der Verbindung, so erhält man die Atomwärme des ersten Bestandtheils, und durch Division derselben mit seinem Atomgewicht ergibt sich seine sp. W. Die Molekularwärme von Kochsalz ist 12; zählt man hiervon die des Natriums = 6 ab, so bleibt für das Chlor in festen Verbindungen 6 übrig; ähnlich erhält man für N = 6. Da die Molekularwärme von RO durchschnittlich 10, so ergibt sich die von O = 4; hierdurch erhält man aus der Molekularwärme 9 des Eises für H = 2,5.

3. **Gesetz von Delaroche und Bérard (1813): Gleiche Volumina verschiedener Gase, deren Moleküle aus gleich vielen Atomen zusammengesetzt sind, haben annähernd gleiche specifische Wärme, oder ihre Volumwärmen sind annähernd einander gleich; die Volumwärmen anderer Gase und Dämpfe stehen zu diesen ungefähr in demselben Verhältnisse wie die Atomzahlen in den Molekülen.**

Gleiche Volumina verschiedener Gase und Dämpfe enthalten nach Avogadros Gesetz gleich viele Moleküle; sind nun in jedem Molekül gleich viele Atome, so sind auch die Atomzahlen in gleichen Volumen gleich groß; folglich bedürfen auch, wenn die Atomwärmen der verschiedenen Gase einander gleich sind, die gleichen Volumina derselben Wärme zu gleicher Erhöhung ihrer lebendigen Kraft. Nun ist aber außerdem die Ausdehnung aller luftartigen Körper durch die Wärme dieselbe; folglich vollbringen sie bei ihrer Erwärmung, wenn sie nur den Luftdruck überwinden, gleiche äußere Arbeit. Eine innere Arbeit der Moleküle ist, da dieselben nach der mechanischen Gastheorie sich nicht mehr einander anziehen, nicht vorhanden; folglich wird die Gleichheit der Volumwärmen durch die innere Arbeit der Moleküle und die äußere Arbeit nicht gestört. Eine innere Arbeit der Atome ist jedoch vorhanden, da die Atome in den Molekülen einander so nahe sind, daß sie sich anziehen, und weil durch die Erwärmung die Atome von einander entfernt werden; die

hierfür nöthige Arbeit kann in verschiedenen Molekülen verschieden sein, und ist sogar in den elementaren Gasen vorhanden, weil deren Atome ebenfalls Moleküle bilden. Dies wird durch die schon angegebene Vergleichung einer Verbrennung von Kohle in Sauerstoff und Stickoxyd angezeigt; denn in Sauerstoff entsteht eine kleinere Verbrennungswärme als in Stickoxyd; es wird also zur Trennung der Sauerstoffatome von einander mehr innere Arbeit geleistet als zu ihrer Trennung von den Stickstoffatomen. Die Sauerstoffatome müssen sich demnach stärker anziehen, als Stickstoff- und Sauerstoffatome; demnach ist die innere Arbeit, welche bei der Erwärmung von Gasen geleistet wird, verschieden, sie verbraucht eine verschiedene Wärmemenge, wodurch die Gleichheit der Volumwärmen etwas gestört wird. Diese Störung kann aber nur gering sein, da sie eben nur von einer der drei Arbeiten herrührt. So ist, wenn die Volumwärme von $H_2 = 1$ ist, die von $O_2 = 1{,}029$, die von $N_2 = 0{,}995$. Stickoxyd, Salzsäure und Kohlenoxyd haben wie die eben genannten Elemente zweiatomige Moleküle; ihre Volumwärme ist daher nahezu eben so groß, für $NO = 1{,}027$, für $HCl = 0{,}982$, für $CO = 1{,}008$; Stickoxydul, Kohlendioxyd und Schwefeldioxyd haben dreiatomige Moleküle; ihre Volumwärmen sind daher nahezu das $1\frac{1}{2}$fache von 1, für $N_2O = 1{,}649$, für $CO_2 = 1{,}569$, für $SO_2 = 1{,}6$. Cyanäthyl (C_3H_5N) enthält 9 Atome, seine Atomwärme 4,403 ist nahezu das $\frac{9}{2}$fache von 1 u. s. w. Leicht ist aus diesen Zahlen, besonders aber aus ausführlicheren Tabellen zu entnehmen, daß die Gleichheit der Volumwärmen und die Vielfachheit derselben um so mehr gestört wird, je coercibler und je zusammengesetzter die Moleküle der Gase sind; im letzten Falle sind größere Verschiedenheiten der inneren Arbeiten der Atome zu erwarten, im ersteren scheint die Nähe des flüssigen Zustandes verändernd einzuwirken.

Diese Gleichheit würde wegen der geringen Arbeit noch schärfer hervortreten, wenn die Grundbedingung, die Gleichheit der Atomwärmen, das Dulong-Petit'sche Gesetz allgemeine Geltung hätte; bei den gewöhnlichen Gasen O, N und H und ihren Verbindungen tritt sie trotz derer Abweichung von diesem Gesetze deutlich hervor, weil dieselben unter sich die gleiche Atomwärme 2,4 haben. Sie gilt natürlich nicht blos für den Fall, daß die Gase die äußere Arbeit der Ueberwindung des Luftdruckes leisten, also sich frei unter constantem Drucke ausdehnen, sondern auch für den Fall, wenn die Gase keine äußere Arbeit leisten, indem sie in ein constantes Volumen eingeschlossen sind; im letzten Falle ist die Volumwärme, wie auch die sp. W. geringer, und zwar um so viel, als die äußere Arbeit, die am Luftdruck geleistet wird, in Wärmemaß ausgedrückt geringer ist. Wie hieraus ersichtlich, muß man die sp. W. der Gase bei constantem Volumen wohl unterscheiden von deren sp. W. bei constantem Drucke. Die oben angeführten Zahlenbeispiele gelten für constantes Volumen.

4. **Gesetz von Wilcke (1772): Die specifischen Wärmen verschiedener Körper sind verschieden; z. B. die sp. W. des Quecksilbers ist $\frac{1}{29}$, des Eisens $\frac{1}{9}$, des Lithiums $\frac{9}{10}$, des Wasserstoffs $= 3$; zur Erwärmung von 1^{kg} Wasser ist 29 mal soviel Wärme nöthig als zu gleicher Erwärmung von 1^{kg} Quecksilber.**

Die Atome der verschiedenen Körper haben bekanntlich das verschiedenste Gewicht; folglich enthält 1^{kg} der verschiedenen Körper eine sehr verschiedene Anzahl von Atomen; da nun die Atome meist gleiche Atomwärme haben, so bedarf 1^{kg} verschiedener Körper zu gleicher Temperatur einer verschiedenen Wärmemenge. Die Verschiedenheit innerer und äußerer Arbeit mag diese Ungleichheit ändern, wird sie aber keineswegs aufheben.

Mischt man 1^{kg} Wasser von 80° mit 1^{kg} Quecksilber von 20°, so erhält das Gemisch eine Temperatur von 78°; das kg Wasser hat demnach seine Temperatur nur um 2° erniedrigt, das kg Quecksilber dagegen die seinige um 58° erhöht, und zwar durch die Wärme, welche das Wasser bei seiner Abkühlung abgegeben hat. Diese Wärme beträgt 2c; zur Erwärmung um 58° braucht demnach 1^{kg} Quecksilber 2c, zur Erwärmung um 1° folglich $\frac{1}{29}$c; die sp. W. des Quecksilbers ist $= \frac{1}{29}$.

5. **Gesetz von Clausius (1850). Die specifische Wärme der Gase ist constant; für andere Körper ändert sich die specifische Wärme in geringem Grade mit der Dichte, der Temperatur, der chemischen Constitution und der allotropischen Modification, in hohem Maße dagegen mit dem Aggregatzustande; Kohlenstoff, Bor und Silicium zeigen innerhalb gewisser Temperaturgrenzen bedeutende Aenderungen mit der Temperatur (H. F. Weber 1875).**

Ein bestimmtes Gewicht eines luftförmigen Körpers enthält immer, welches auch seine Dichte, seine Temperatur, seine Modification sein möge, dieselbe Anzahl von Atomen; die Erhöhung der Temperatur dieses Gasgewichtes um 1° besteht demnach unter allen Umständen darin, immer derselben Anzahl von Atomen dieselbe Erhöhung der lebendigen

Kraft zu ertheilen, wozu immer dieselbe lebendige Kraft oder dieselbe Wärme nöthig ist. Die äußere Arbeit ist ebenfalls bei constantem Drucke immer dieselbe, bei constantem Volumen = Null; die innere Arbeit der Moleküle fällt bei den Luftarten weg, und die innere Arbeit der Atome ist gering, bietet also in verschiedenen Zuständen eines und desselben Gases nur unmerkliche Verschiedenheiten dar; folglich ist die sp. W. eines und desselben Gases unter allen Umständen dieselbe. Clausius sprach diesen Satz, gestützt auf die mechanische Wärmetheorie, schon zu einer Zeit aus, wo man aus nicht ganz genauen Versuchen die entgegengesetzte Meinung gewonnen hatte; durch Veröffentlichung der genauen Versuchsresultate Regnaults erhielt der Satz seine Bestätigung, und gewann hierdurch die mechanische Wärmetheorie eine wesentliche Stütze. Für die übrigen Körper könnte der Satz nur ausgesprochen werden, wenn man sich dieselben in stark überhitzte Dämpfe verwandelt denkt, wo jeder Einfluß der Anziehung, jede Veränderlichkeit der inneren und äußeren Arbeit wegfällt. Wird in festen oder flüssigen Körpern die Disgregation vermehrt, wird also die Dichte kleiner, die Temperatur erhöht, eine chemische Verbindung zersetzt, so werden die Atome und Moleküle weiter von einander entfernt und die Anziehung wird kleiner. Zugeführte Wärme kann jetzt die Anziehung leichter überwinden und kann eine größere innere und äußere Arbeit leisten, worauf auch das Wachsen des Ausdehnungscoëfficienten mit der Temperatur deutet; folglich wird ein größerer Theil der zugeführten Wärme für Arbeit verbraucht; die Summe dieser größeren Arbeitswärme und der gleich bleibenden Atom- oder Molekularwärme ergibt also für einen Körper von vergrößerter Disgregation eine größere sp. W.; besonders viel größer wird die Arbeitswärme, wenn ein fester Körper in den flüssigen Zustand übergegangen ist; folglich ist die sp. W. eines Körpers im flüssigen Zustande größer als im festen; Wasser hat eine größere sp. W. als Eis. Im gasförmigen Zustande ist die innere Arbeit theilweise ganz, theilweise nahezu = 0; folglich muß die sp. W. hier wieder kleiner werden; sie wird sogar viel kleiner, wenn der Körper gasförmige Elemente enthält, weil deren Atomwärme in noch unerklärter Weise viel kleiner als die der festen Elemente ist. Clausius sprach (1850) schon aus, daß die sp. W. des Wasserdampfes viel kleiner als der von Delaroche und Bérard angegebene Werth 0,847 sein müsse, und erhielt auch hier eine Bestätigung durch Regnaults genauere Zahl = 0,475.

Die Veränderung mit dem Aggregatzustande ist nach diesen Zahlen eine sehr bedeutende, während die übrigen Veränderungen mit der Dichte, mit der Temperatur u. s. w. gering sind. Auffällig ist dem gegenüber die ungemein große Veränderung von Kohlenstoff, Bor und Silicium mit der Temperatur, welche von H. F. Weber neuerdings entdeckt worden ist, und das Aufhören dieser starken Veränderlichkeit bei den Endtemperaturen 600 und 200°, oberhalb welcher die 3 Elemente nur die kleine Veränderlichkeit aller übrigen Körper mit der Temperatur zeigen; hierdurch wird der Gedanke nahe gelegt, daß auch die anderen Elemente eine solche, vielleicht niedrig gelegene Endtemperatur haben können, unterhalb derer die sp. W. sich stark, oberhalb derer sie sich aber schwach mit der Temperatur ändern dürfte. Wie schon Wöstyn (1848) den Satz ausgesprochen hatte, daß die sp. W. in den Verbindungen dieselbe sei wie in den Elementen, und Kopp (1863) nachgewiesen hatte, daß die festen Elemente sowohl ihre normale, wie ihre abnorme Atomwärme in ihre festen Verbindungen mit hinübernehmen, so hat H. F. Weber (1875) gefunden, daß die abnormen Elemente sogar das Wachsen ihrer sp. W. mit der Temperatur auch in ihren Verbindungen unverkennbar wahrnehmen lassen.

Auch die Veränderlichkeit mit der allotropischen Modification, die zuerst von Regnault (1841) für Kohle und Schwefel gefunden wurde, ist durch die mechanische Wärmetheorie erklärlich, da in verschiedenen Modificationen die Moleküle gegen einander oder die Atome in den Molekülen gegen einander eine verschiedene Lage haben müssen, oder auch beide Fälle vereinigt stattfinden können, wodurch jedenfalls die innere Arbeit, wenn auch nur sehr wenig verändert wird. Wirklich sind auch die Veränderungen so klein, daß Kopp (1865) glaubte, sie lägen in den Grenzen der Beobachtungsfehler; hiergegen sprechen neuere Beobachtungen von Bettendorff und Wüllner (1868), welche erhebliche Abweichungen für die Modificationen von Arsen und Selen nachweisen, und die Forschungen von H. F. Weber (1875), nach welchen allerdings der Meinung von Regnault entgegen, alle undurchsichtigen Modificationen des Kohlenstoffs (Graphit, dichte und poröse amorphe Kohle) dieselbe sp. W., jedoch eine erheblich größere sp. W. als die durchsichtige Modification, der Diamant haben, wonach weiter die sp. W. beider Mod. mit der Tem. steigen, sich aber immer mehr einander nähern und endlich bei der Endtemperatur, wo ihr optischer Unterschied in der gleichen Gluth zu Ende ist, zusammenfallen.

6. **Gesetz von Laplace (1817). Das Verhältniß der specifischen Wärme der Gase bei constantem Drucke zu der bei constantem Volumen ist constant = 1,41,** vorausgesetzt daß der constante Druck der einer Atmosphäre ist.



Beweis. Bei constantem Volumen ist nur Wärme nöthig zur Erwärmung, bei constantem Drucke aber auch zur Ueberwindung dieses Druckes während der ganzen Ausdehnung; folglich muß die sp. W. bei constantem Drucke um den Wärmebetrag dieser äußeren Arbeit größer sein als die sp. W. bei constantem Volumen; da nun wegen der gleichen Ausdehnung aller Gase diese äußere Arbeit immer dieselbe ist, so muß bei allen Gasen und bei allen Temperaturen für Erwärmung bei constantem Drucke ein gleicher Wärmebetrag mehr vorhanden sein als bei constantem Volumen. — Die äußere Arbeit beträgt aber bei der Erwärmung von 1^{cbm} Gas um $1^{o} = 10\,328 . 0{,}003\,665 = 37{,}85^{mk}$, wofür $37{,}85 : 424 = 0{,}0893^{c}$ nöthig sind. Nun ist nach Regnault die sp. W. von 1^{kg} Luft bei constantem Drucke $= 0{,}23\,741$; daher beträgt die sp. W. von 1^{cbm} oder $1{,}293^{kg}$ $0{,}23\,741 . 1{,}293 = 0{,}30\,697$. Da von dieser Wärme $0{,}0893^{c}$ für äußere Arbeit verbraucht werden, so bleiben für Erwärmung $0{,}30\,697 - 0{,}0893 = 0{,}21767^{c}$. Diese Zahl gilt für 1^{cbm}; für 1^{kg} ist demnach die Wärmecapacität $= 0{,}21767 : 1{,}293 = 0{,}1683$. Diese für die ausschließliche Erwärmung von 1^{kg} Luft nöthige Wärme ist aber nichts Anderes als die sp. W. der Luft bei constantem Volumen; folglich ist das Verhältniß der sp. W. bei constantem Drucke zu der sp. W. bei constantem Volumen $= 0{,}23\,741 : 0{,}1683 = 1{,}41$.

Die angeführten Gesetze ergaben sich höchst einfach aus der mechanischen Wärmetheorie. In der Geschichte der Wissenschaft folgten aber diese Ergebnisse nur aus sehr zahlreichen, die höchste Genauigkeit anstrebenden und höchst anstrengenden experimentellen Untersuchungen, welche die beste Lebenskraft zahlreicher Forscher in Anspruch nahmen und meist sehr complicirte und kostspielige Apparate und die feinsten und durchdachtesten Methoden erforderlich machten. Nach der früheren Wärmetheorie waren die Ergebnisse meistens räthselhaft; die mechanische Wärmetheorie hat nicht nur diese Räthsel gelöst, sondern auch manche Resultate berichtigt und geklärt, ja sogar neue vorausgesagt; darum ist die Lehre von der sp. W. eine wesentliche Stütze dieser Theorie. Wie die neueren, von dem Lichte der Theorie gehobenen Forschungen neue Räthsel aufdeckten und eine tiefere Einsicht in das Wesen des Stoffes anbahnen, ist schon erwähnt worden. Um so nothwendiger ist es daher noch, die experimentellen Methoden und einige Zahlenresultate kennen zu lernen.

Methoden zur Bestimmung der specifischen Wärme fester und flüssiger Körper. 429 a. Die Mischungsmethode oder das Wassercalorimeter (Neumann 1831, Regnault 1840). Man erwärmt den zu prüfenden Körper m bis zu einer gewissen Temperatur t und bringt ihn dann in eine bestimmte Wassermenge m′ von der Temperatur t′; er theilt alsdann dem Wasser soviel Wärme mit, bis die Mischung eine gemeinsame Temperatur T besitzt, aus welcher man die sp. W. c des Körpers berechnen kann. Denn der Körper enthält, vom Gefrierpunkte an gerechnet, vor der Mischung die Wärme mct, die Flüssigkeit, deren sp. W. $= c'$ sein möge, ebenfalls vor der Mischung die Wärme $m'c't'$, beide also zusammen $mct + m'c't'$. Nach der Mischung, wo die gemeinsame Temperatur stattfindet, ist die betreffende Wärme $= (mc + m'c')\,T$. Ist durch diese Mischung keine Wärme verloren, so besteht die Gleichung $mct + m'c't' = (mc + m'c')\,T$, woraus man findet $c = m'c'\,(T - t') : m\,(t - T)$.

Ist die Calorimeterflüssigkeit Wasser, so ist $c' = 1$; für Körper, die im Wasser löslich sind, oder von denen nur geringe Mengen zu Gebote stehen, wendet man als Calorimeterflüssigkeit Terpentinöl an, weil dessen Wärmecapacität sehr gering ist, und demnach schon eine geringe Wärme zu meßbarer Temperaturerhöhung ausreicht. Die Schwierigkeiten dieser Methoden liegen darin, die Temperaturen genau zu messen, die Temperatur des Körpers während des Ueberganges in die Calorimeterflüssigkeit constant zu erhalten und die unvermeidlichen Wärmeverluste während des Versuches genau zu finden. Die hierdurch entstandenen Fehler sind verhältnißmäßig um so kleiner, je größer die Körpermasse und die Menge der Calorimeterflüssigkeit ist und umgekehrt; daher ist die Methode nur für Körper möglich, von denen größere Massen zu Gebote stehen. — Regnault brachte den Körper in einem an feinen Fäden hängenden Körbchen in eine weite Weißblechröhre, welche von einem 2ten und diese von einem 3ten Blechgefäße umgeben war und durch deren Deckel ein Thermometer ging. In den inneren Ringraum wurde Dampf geleitet und dadurch der Körper auf eine am Thermometer ablesbare Temperatur erhitzt; dann wurde das Körbchen rasch in das unter dem Gefäße stehende Calorimeter herabgelassen und dieses auf einem Schlitten weggezogen, um die Mischtemperatur zu beobachten. Um die Wärmeverluste an die Umgebung möglichst zu compensiren, ließ man nach Rumford vor dem Versuche die Calorimeterflüssigkeit soweit unter die Lufttemperatur abkühlen, als sie nach dem Versuche über dieselbe erwärmt ist. Flüssigkeiten füllte Regnault in dünne Röhrchen, die er in das

Körbchen legte. Kopp (1864) entfernte das Calorimeter weiter von dem Erwärmungsapparat, um dessen Strahlung abzuschwächen, erhitzte den festen Körper in einem kleinen Gläschen von Wasser bedeckt in einem Quecksilberbade und schüttete denselben rasch in das Calorimeter; nach dieser kurzen Methode untersuchten er und später (1868) Wüllner die allotropen Modificationen, sowie Schüller (1869) zahlreiche Salzlösungen. Pfaundler (1868) umging die hierbei möglichen Fehler durch Erwärmung gleicher Mengen der zu untersuchenden Flüssigkeit und des Wassers durch je eine Drahtspirale von gleichem Widerstande, welche von einem und demselben elektrischen Strome durchflossen wird. Thomsen (1870) erhitzte gleiche Mengen verschiedener Flüssigkeiten durch Verbrennung eines und desselben Wasserstoffvolumens in dem Calorimeter und berechnete die sp. W. aus den verschiedenen Temperaturerhöhungen, welche dieselben durch eine und dieselbe Wärmemenge erfuhren. (Richmanns Regel, S. Aufg. 675.)

430 b. Die Methode des Eisschmelzens oder das Eiscalorimeter (Lavoisier und Laplace 1780, Bunsen 1870). Man erwärmt den zu prüfenden Körper m zur Temperatur t und bringt denselben in Eis von 0°; durch seine allmälige Abkühlung bis auf 0° bringt er eine gewisse Eismenge zum Schmelzen, deren Gewicht p aus dem Gewichte des abfließenden Wassers erkannt wird. Dieses Eis bedarf zum Schmelzen einer Wärme von 80p°; die von dem Körper, dessen sp. W. = c sein möge, abgegebene Wärme mct muß der Schmelzwärme gleich sein; hieraus folgt für die sp. W. der Werth $c = 80p : mt$.

Lavoisier und Laplace benutzten ein doppelwandiges Blechgefäß, dessen innerer und äußerer Raum durch Hähne mit der Luft communicirten, in den Innenraum wurde in einem Drahtkörbchen der Körper in Eisklümpchen gebettet, der Außenraum ebenfalls mit Eis gefüllt und das Ganze mit einem hohlen eisgefüllten Deckel verschlossen. Obwohl diese Methode sehr einfach ist, so ist sie wegen der hohen Schmelzwärme des Eises nur für große Körpermengen anwendbar; auch sind Fehlerquellen dadurch vorhanden, daß das Wasser dem Eise adhärirt, und daß äußere Wärme dennoch eindringen kann. Bunsens (1870) neues Eiscalorimeter ist für kleinere Körpermengen geeignet. Dasselbe besteht aus einem U-förmig gebogenen Glasrohre, dessen einer Schenkel in einen weiten Glascylinder aus einander geht, in dessen Deckel ein nach oben offenes Proberöhrchen eingeschmolzen ist; der das Proberöhrchen umgebende, obere Cylinderraum ist mit Wasser ausgefüllt, während der untere Theil desselben, sowie der andere längere Schenkel mit Quecksilber gefüllt sind. In die offene Mündung dieses Schenkels wird ein Stöpsel mit einer langen Röhre eingepreßt, in welche hierbei das Quecksilber hinaufsteigt. Nun wird das Wasser im Cylinder zum Gefrieren gebracht, indem man mittels zweier Röhren öfters sehr kalten Alkohol durch die Proberöhre steigen läßt. Dann wird auch in das Proberöhrchen Wasser und in dieses der zu untersuchende Körper gebracht; die Wärme desselben schmilzt einen Theil des umliegenden Eises, dessen Menge aus dem Fallen des Quecksilbers in der engen Stöpselröhre erkannt wird, und aus welcher dann die sp. W. leicht zu berechnen ist. So fand Bunsen die sp. W. von Ruthenium, Indium, Calcium.

c. Die Methode des Erkaltens. (Tobias Mayer 1796, Regnault 1840). Von zwei warmen Körpern von gleichem Gewichte, gleicher Temperatur und gleichem Ausstrahlungsvermögen, die in zwei gleich kalte, luftleere Räume gebracht werden, muß derjenige durch Ausstrahlung am schnellsten erkalten, der die kleinste sp. W. hat. Hierauf beruht die Methode des Erkaltens. Der eine Körper m erkalte in der Zeit s um t°, so verliert er, wenn seine sp. W. = c ist, in 1 Secunde die Wärme $mct : s$; der andere Körper m' mit der sp. W. c' kühle sich in der Zeit s' um t° ab, so verliert er in 1 Sec. die Wärme $m'c't : s'$. Da unter obigen Voraussetzungen die in 1 Sec. ausgestrahlten Wärmemengen einander gleich sein müssen, so ist $mct : s = m'c't : s'$, woraus $c' = mcs' : m's$.

Dulong und Petit benutzten einen bleiernen, inwendig rußgeschwärzten Behälter, durch dessen Deckel luftdicht ein Thermometer ging, das mittels seiner Röhre ein Gefäß von Silberblech trug. In dieses wurde zu der Thermometerkugel der betreffende Körper gebracht, und das Ganze in ein Wasserbad von bestimmer Temperatur gestellt. Dann wurde die Zeit beobachtet, welche zu einem Sinken des Thermometers um 5° nothwendig war. Wurde derselbe Versuch mit Wasser gemacht, so ergab die Anwendung obiger Rechnung auf diese zwei Versuche die verlangte sp. W. — Diese Methode setzt voraus, daß die Erkaltung durch die ganze Körpermasse gleichmäßig geschehe, und daß alle Stoffe ihre Wärme in gleicher Weise an das Silberblech abgeben; am geeignetsten ist sie noch für flüssige Körper.

Versuchsresultate über die specifische Wärme fester und flüssiger Körper. 431
Das Wasser hat mit Ausnahme des Wasserstoffs, dessen sp. W. = 3,4 ist, die größte sp. W.; die aller anderen Stoffe ist kleiner als 1. So ist sie für Alkohol = 0,6, Aether = 0,5, Terpentinöl = 0,4, Schwefelkohlenstoff = 0,2, Brom 0,1, Quecksilber 0,033, Lithium 0,9, Zucker u. a. organ. Verbindungen 0,3, Magnesium 0,25, Schwefel 0,2, Gläser, gewöhnliche Steine, viele Salze, Bodengrund = 0,2, Eisen 0,11, Oxyde, Schwefel- und Chlormetalle 0,1, Zink, Kupfer, Messing 0,09, Zinn und Silber 0,06, manche Legirungen 0,04, Gold und Platin 0,03. In diesen Zahlen liegt außer der Bestätigung des Wilcke'schen Gesetzes noch die Thatsache, daß die sp. W. flüssiger Körper durchschnittlich größer ist als die fester Körper; deutlicher tritt dies gemäß Gesetz 5. in den beiden Aggregatzuständen eines und desselben Körpers hervor; die sp. W. des Eises ist 0,5, des Wassers 1; die von festem Salpeter 0,23, von flüssigem 0,33; sp. W. von festem Schwefel 0,18, von flüssigem 0,23; von festem Phosphor 0,19, von flüssigem 0,21; von festem Zinn 0,056, von flüssigem 0,063; von festem Blei 0,03, von flüssigem 0,04. Aehnlich zeigen sich die Unterschiede in der Dichte: Diamant hat von —50 bis 250° die sp. W. 0,06 bis 0,3, Graphit dagegen 0,13 bis 0,4; durch Hämmern geht die sp. W. des Kupfers von 0,095 auf 0,093 herab. Zahlreich sind die Versuche über die Wirkungen der Temperatur außer den öfter angeführten von Weber: Schon Dulong und Petit fanden für die mittlere sp. W. des Eisens zwischen 0 und 100° den Werth 0,1098, dagegen zwischen 0 und 290° den Werth 0,1218; die sp. W. des Wassers steigert sich nach neuen Versuchen von Boscha (1874) bei der Erwärmung von 0 bis 200° um $^1/_{50}$; doch sind die Angaben sehr verschieden. Bettendorff und Wüllner fanden für allotropische Modificationen folgende Zahlen: krystallisirtes Arsen 0,083, amorphes 0,0758; krystallinisches Selen 0,084, amorphes 0,0953. Die Kleinheit aller dieser Unterschiede spricht ebenfalls für den Satz, daß die sp. W. eines Elements sich in den Verbindungen erhält, was durch die weite Geltung des Neumann'schen Gesetzes bestätigt wird. Hiernach läßt sich die sp. W. einer Verbindung annähernd aus den sp. W. der Bestandtheile berechnen: man addirt die sp. W. der Atomgewichte der Bestandtheile und dividirt die Summe durch das Molekulargewicht der Verbindung. So berechnet sich die sp. W. von Schwefelkupfer Cu_2S = $(2 . 0{,}095 . 64 + 0{,}18 . 32) : (2 . 64 + 32) = 0{,}112$, während Regnaults Versuche 0,120 ergaben. Umgekehrt kann man aus der sp. W. einer Verbindung die sp. W. eines Bestandtheils oder auch das Atomgewicht desselben berechnen, falls die übrigen Größen gegeben sind.

Berechnet man die sp. W. chemischer Verbindungen aus den sp. W. ihrer Bestandtheile, wie eben ein Beispiel durchgeführt wurde, so erhält man meist die sp. W. größer als durch den Versuch; so ergibt eine Rechnung für Schwefelzink 0,131, während Regnaults Versuche 0,123 ergeben; dies entspricht der Regel, daß eine Verdichtung die sp. W. verringert, indem mit der chemischen Vereinigung eine Verminderung der Disgregation, eine Verdichtung verbunden ist. Man hat sich hieraus den Schluß erlaubt, daß ein Gleichbleiben der sp. W. bei einem Zusammentreffen verschiedener Stoffe darauf hindeute, daß dieselben nicht eine chemische Verbindung, sondern nur ein mechanisches Gemenge bilden. Diesen Schluß unterstützt Regnaults Untersuchung der sp. W. von Legirungen, welche sich hierbei gleich dem Mittel aus den sp. W. der Gemengtheile, ja meist noch etwas größer als diese ergaben. In derselben Richtung untersuchte Schüller (1869) die Salzlösungen, fand aber die beobachtete sp. W. meist kleiner als das berechnete Mittel, und zwar zeigte sich bei verschiedenen Concentrationen der Lösungen das Verhältniß zwischen der Beobachtung und dem Mittel bald constant z. B. bei Kochsalz, bald veränderlich, und in dem letzten Falle mit steigendem Procentgehalte bald zunehmend und selbst die Einheit übersteigend, bald abnehmend. Noch umfassendere Untersuchungen führten Thomsen (1870) zu dem allgemeinen Schlusse, daß beim Mischen von Wasser mit einer wässerigen Lösung die sp. W. stets geringer werde. Marignac (1870) warf dagegen ein, daß bei der Mischung von Alkohol mit Wasser die sp. W. nicht blos das Mittel, sondern sogar die sp. W. des Wassers übersteige, sowie daß Zucker- und Ammoniaklösung eine sp. W. gleich dem Mittel aus denjenigen ihrer Bestandtheile hätten; indessen können diese wenigen Ausnahmen jenen Schluß Thomsens nicht beeinträchtigen, aus dem man sodann folgern dürfte, daß die Lösungen eine Art chemischer Constitution hätten, die sich mit der Concentration ändere. — Thomsen untersuchte auch die Molekularwärmen der Lösungen und fand entsprechend dem Thomsen-Schüller'schen Gesetze, daß die Molekularwärme einer Lösung immer geringer ist als die Summe der Molekularwärmen der sie bildenden Flüssigkeiten, ja daß in manchen Fällen z. B. bei Schwefelsäure und Salpetersäure die Molekularwärme der geringeren Concentrationsgrade mit der des Wassers übereinstimmt und bei der Salzsäure sogar unter dieselbe herabgeht, so daß eine Lösung mit 17% ClH zehn % weniger Wärme bedarf als das in ihr enthaltene Wasser.

432 **Die Bestimmung der specifischen Wärme der Gase** (Delaroche und Bérard 1813). a. Bei constantem Drucke. Eine bestimmte Menge des Gases wird zu einer genau bestimmten Temperatur erwärmt und mittels eines Schlangenrohres durch ein Wassercalorimeter geleitet. Die Menge des Wassers, sowie seine Temperatur vor und nach dem Versuche werden genau gemessen, und aus diesen Größen ist dann die Unbekannte zu bestimmen. Die erste genauere Verwirklichung dieser Idee geschah von Delaroche und Bérard; noch größere Genauigkeit suchte in den letzten Jahren Regnault zu erzielen.

Den constanten Druck brachten Delaroche und Bérard durch eine Mariotte'sche Flasche hervor, aus welcher Wasser in eine unter ihr stehende 3fach tubulirte Wulf'sche Flasche floß; die in derselben befindliche Luft strömte durch eine Röhre in einen Glasballon, in welchem eine mit dem zu untersuchenden Gase gefüllte Blase an der Mündung einer anderen Röhre hing. Durch den immer gleichbleibenden Druck der in den Ballon strömenden Luft wurde das Gas aus der Blase in die Röhre getrieben und auf dem Verlaufe derselben durch Dampf, der in ein die Röhre umgebendes, längeres Mantelrohr einströmte, erwärmt; nach dem Austritte aus diesem Mantelrohre ging das Gas an einem Thermometer vorbei, wodurch man die Temperatur desselben erfuhr, und dann durch das Calorimeter. Aus diesem wurde es durch eine zweite, ganz gleiche Zusammenstellung von Apparaten in eine 2te Blase eingesaugt, und dann durch Verstellung von Hähnen abermals durch den Doppelapparat zurückgetrieben, was man beliebig oft wiederholen konnte. Das Volumen des Gases konnte aus dem Sinken des Wassers in der Mariotte'schen Flasche entnommen und hieraus das Gewicht desselben berechnet werden. Ungenauigkeiten konnten hier entstehen dadurch, daß das Thermometer der Gase Wärme durch Strahlung nach außen verlor, daß das Calorimeter Wärme vom Heizapparate trotz noch so großer Entfernung durch Leitung empfing, daß die Gase in der Blase durch die Feuchtigkeit der treibenden Luft ebenfalls feucht und durch Diffusion sogar unrein werden mußten. Regnault fand daher bei seinen Versuchen vielfach andere Resultate als Delaroche und Bérard. Für Luft ergab sich 0,23741, für O 0,21751, für H 3,409, für N 0,2438, für Chlor 0,21099. Hieraus ergeben sich die Atomwärmen für O = 3,4, für H = 3,4, für N = 3,4, für Cl = 4,6, also eine fast absolute Gleichheit für die 3 permanenten, elementaren Gase, aber Ungleichheit sowohl mit den festen Elementen als auch mit den übrigen Gasen. Leicht ist auch aus den angegebenen Zahlen durch Rechnung zu finden, daß die sp. W. gleicher Volume der verschiedenen absoluten Gase dieselbe und zwar = 0,24 ist, und daß die sp. Volumw. der anderen Gase um so mehr hiervon abweicht und um so größer wird, je coercibler dieselben sind.

433 b. Bei constantem Volumen. Die sp. W. bei constantem Drucke übertrifft die sp. W. bei constantem Volumen um den Betrag der Ausdehnungswärme, die zur Ueberwindung des äußeren Luftdruckes p bei der Ausdehnung des Luftvolumens v_0 von 0^0 auf 1^0 nöthig ist; diese Wärmemenge ist $= pv_0\alpha A$ Cal; ist demnach die sp. W. bei constantem Drucke = c, die bei constantem Volumen = c', so ist $c = c' + pv_0\alpha A$; hieraus folgt für das Verhältniß der zwei sp. W. $c : c' = 1 + pv_0\alpha A : c'$. Der zweite Summand in diesem Ausdrucke ist aber gleich der Temperaturerhöhung, welche durch eine Zusammendrückung $v_0\alpha$ mittels des Druckes p hervorgebracht wird; denn ist $v_0\alpha$ die Zusammendrückung des Volumens v_0 durch den Druck p, so ist die hierbei geleistete Arbeit $= pv_0\alpha$, also die entstandene Wärme $= pv_0\alpha A$. Unter dem constanten Drucke p erwärmt sich aber durch die Wärme c' die Luft um 1^0, daher durch die Wärme $pv_0\alpha A$ um $x = pv_0\alpha A : c'$; bestimmt man daher diese Temperaturerhöhung x, so kennt man auch das vielbesprochene und wichtige Verhältniß $c : c'$ oder $k = 1 + x = 1{,}41$.

Jene Temperaturerhöhung findet man durch einen Versuch von Clément und Desormes (1819). Ein großer Glasballon ist durch einen großen Hahn mit einer Luftpumpe oder mit der Luft in oder außer Verbindung zu setzen und steht außerdem mit einem empfindlichen Wasser-Manometer in Communication. Durch theilweise Entleerung des Ballons steigt das letztere auf h', so daß die innere Spannung nur noch $= p - h'$. Läßt man nun neue Luft einströmen, so wird das Volumen der darin gebliebenen Luft durch Compression um den Bruchtheil δ kleiner, beträgt also nur noch $1 - \delta$ des früheren Volumens; würde bei dieser Compression keine Wärme entstehen, so würde nach Mariotte die Spannung der Luft sein $(p - h') : (1 - \delta)$. Wird aber die Temperatur t um x^0 gesteigert, so steigt nach Gay-Lussac die Spannung auf $[1 + \alpha(t + x)] : (1 + \alpha t)$; da sie indeß nach der Verbin-

dung mit der äußeren Luft gleich der Spannung p derselben sein muß, so entsteht die Gl. $p = (p - h')[1 + \alpha(t + x)] : (1 - \delta)(1 + \alpha t)$. Läßt man nun den Ballon abkühlen, bis $x = 0$, so sinkt die Spannung wieder, das Manometer hat nur noch die Steigung h, die Spannung ist also $p - h$; folglich ist nach Mariotte $(p - h') : (1 - \delta) = p - h$. Diese 2 Gleichungen ermöglichen die Berechnung von δ, der Compression, und von x, der hierdurch bewirkten Temperatursteigerung; es ergibt sich $\delta = (h' - h) : (p - h)$ und $x = (1 + \alpha t) h : \alpha(p - h)$. Ist nun aber die Zusammendrückung $\delta = v_0 \alpha$ und hervorgerufen durch den Luftdruck p, so ist x nach dem Eingange dieses Beweises gleich dem zweiten Summanden in dem Werthe für $c : c'$; die zweite Bedingung ist hier erfüllt, und die erste ist leicht zu erfüllen, indem wir das Volumen v_0 bei 0° durch das hier betrachtete Volumen 1 bei t° ausdrücken; dasselbe ist $v_0 = 1 : (1 + \alpha t)$; daher ist $\delta = \alpha : (1 + \alpha t)$. Setzen wir die beiden Werthe von δ einander gleich, so ist $\alpha : (1 + \alpha t) = (h' - h) : (p - h)$ und umgekehrt $(1 + \alpha t) : \alpha = (p - h) : (h' - h)$. Wenn wir nun den Werth für $1 + \alpha t) : \alpha$ in den für x substituiren, so ergibt sich die gesuchte Temperaturerhöhung $x = (p - h) h : (h' - h)(p - h) = h : (h' - h)$. Dieselbe kann daher aus den beiden Manometerständen leicht berechnet werden, woraus sich der Werth von $k = 1 + h : (h' - h)$ ergibt. Clément und Desormes fanden $k = 1{,}357$, Külp bei einem etwas veränderten Versuche 1,425, während unsere Berechnung aus dem mech. Aeq. der Wärme 1,41 ergab. Dieser Werth verdient am meisten Vertrauen, weil er sich aus den genauesten Beobachtungen der Schallgeschwindigkeit berechnen läßt.

434 Die Geschwindigkeit und die Schwingungszahl des Schalles vergrößern sich um den Factor $\sqrt{k}$, durch die in der Verdichtungswelle erzeugte und in der Verdünnungswelle verzehrte Wärme (Laplace 1817).

Beweis. Die Schallgeschwindigkeit ist nach der bekannten Formel (30) gleich $\sqrt{(e : d)}$, worin d, die Masse der Volumeinheit, = s, dem Gewichte der Volumeinheit dividirt durch g, die Acceleration der Schwere, also $= s : g$, und worin e gleich dem Luftdrucke p; demnach ist die Geschw. $\sqrt{(pg : s)}$ oder auch $= \sqrt{[g : (s : p)]}$. Hierin bedeuten s und p die Dichte und den Druck bei t°; sind s_0 und p_0 dieselben Größen bei 0°, also p_0 = dem Gewichte von 0,76^m Quecksilber, so ist $p : s(1 + \alpha t) = p_0 : s_0$. Wächst nun p, der Luftdruck, um s, so wachse t um Δt und s um Δs, wobei natürlich die Proportion $s : p = \Delta s : s$ stattfindet; hierdurch nimmt die letzte Gl. folgende Gestalt an $s : [\Delta s(1 + \alpha t) + \alpha s \Delta t] = p_0 : s_0$, woraus $1 = (p_0 : s_0)(1 + \alpha t)(\Delta s : s + \alpha \Delta t : (1 + \alpha t))$. Durch die eben vorausgesetzte Druckzunahme findet die Compression $\Delta s : s$ statt mit der Temperaturzunahme Δt; in dem Versuche von Clément und Desormes war die Compression $= \alpha(1 + \alpha t)$ und die entsprechende Temperaturzunahme $= h : (h' - h)$; daraus folgt die Proportion $(\Delta s : s) : (\alpha : (1 + \alpha t)) = \Delta t : (h : (h' - h))$, woraus $\alpha \Delta t : (1 + \alpha t) = (\Delta s : s) h : (h' - h)$. Wenn wir diesen Werth in den obigen Ausdruck für 1 substituiren und zugleich statt $\Delta s : s$ den gleichen Bruch $s : p$ setzen, so ergibt sich $1 = (p_0 : s_0)(s + \alpha t)[(s : p) + (s : p) h : (h' - h)] = (p_0 : s_0)(1 + \alpha t)[1 + h : (h' - h)] . (s : p)$. Nun ist der eckige Klammerausdruck direct = k nach dem vorigen Beweise; folglich ist jetzt $1 = (p_0 : s_0)(1 + \alpha t) k (s : p)$, woraus folgt $(s : p) = (s_0 : p_0) : (1 + \alpha t) k$. Wird dieser Werth von $s : p$ in die obige zweite Formel für die Schallgeschw. eingesetzt, so ergibt sich dieselbe $= \sqrt{[g(1 + \alpha t) k : (s_0 : p_0)]}$. Hierin ist p_0 der Luftdruck = dem Barometerstande h mal dem sp. G. s' des Quecksilbers; durch Einsetzung dieser Werthe ergibt sich die Schallgeschwindigkeit $= \sqrt{[(1{,}42\, hs' g : s)(1 + \alpha t)]}$, was ganz mit Fl. (40) S. 292 übereinstimmt, vorausgesetzt daß $k = 1{,}42$ angenommen wird. Nimmt man aber umgekehrt den Factor k als unbekannt an und berechnet ihn aus der Schallgeschwindigkeit 332,26, so findet man $k = 1{,}41$. Die neuesten Bestimmungen von Kohlrausch (1869) und von Witte (1869) mittels des Metallbarometers statt des schwankenden Wassermanometers ergeben viel kleinere Zahlen: 1,302 und 1,35, so daß über diesen Gegenstand noch genauere Forschungen zu wünschen bleiben. — Solche Versuche sind seitdem von Röntgen (1873) nach Aufweisung eines principiellen Fehlers in Kohlrauschs Bestimmungsweise und unter Anwendung aller Vorsichtsmaßregeln angestellt worden, und ergaben für Luft $k = 1{,}4053$, für CO_2 $k = 1{,}3052$, für H $k = 1{,}3852$. Die einfachere Methode der mechanischen Wärmetheorie, die nur mit höherer Rechnung verständlich wird, wurde von J. J. Müller (1875) auch auf feste und flüssige Körper ausgedehnt.

435 **Anwendung der specifischen Wärme.** Man wendet die Größen der sp. W. zunächst an, um die Wärmemengen aufzufinden, welche zur Erhitzung eines Körpers bis zu einer bestimmten Temperatur nöthig sind. Umgekehrt bestimmt man aus der bekannten sp. W. eines erhitzten Körpers und aus der Wärmemenge, welche derselbe bei der Abkühlung bis zu einem gemessenen Grade an ein Wassercalorimeter abgibt, die Temperatur jener Erhitzung; hierbei setzt man freilich die Beständigkeit der sp. W. voraus, kommt also nicht zu genauen Resultaten. Die Chemiker benutzen die bekannte sp. W. eines Stoffes, um

das Atomgewicht desselben zu bestimmen, indem sie das Dulong'sche Product ac = 6,4 durch die sp. W. dividiren. Pfaundler machte (1866) in einer Untersuchung der sp. W. der Bodenarten darauf aufmerksam, daß eine Bodenart von geringer sp. W. sich rasch erwärmt und rasch abkühlt, während Erde von hoher sp. W. langsames Erwärmen und langsames Abkühlen erfahre, daß feuchte, humusfreie Erden eine hohe sp. W., bis zu 0,5 besitzen, daß dagegen trockene, humusreiche Bodenarten, wie Kalk und Sand nur 0,2 sp. W. haben. Die hohe sp. W. des Wassers trägt zur Ausgleichung der Temperaturextreme in Meeresgegenden, zu der geringen Veränderlichkeit des Inselklimas bei; denn im Sommer wird die Wärme von dem Wasser zu seiner Erwärmung verbraucht und im Winter wird dieselbe langsam wieder abgegeben. Der Winter ist in Irland milder als in der Lombardei, die Myrte kommt dort im Freien fort, aber in dem kühlen Sommer reift die Traube nicht.

436 **Aufg.** 675. Mischt man die Massen m und m′ desselben Körpers, aber von den verschiedenen Temperaturen t und t′, so entsteht welche Mischtemperatur? Aufl.: $T = (mt + m't') : (m + m')$. — (Richmanns Regel 1750). — A. 676. Welche Mischtemperatur entsteht, wenn 8^{kg} Quecksilber von 50° und 12^{kg} von 10° gemischt werden? Aufl.: 26°. — A. 677. In einem Zimmer von 6^m Länge, 3^m Breite und 5^m Höhe herrscht eine Wärme von 20°; in einem daneben liegenden Zimmer von 8^m Länge, 4^m Breite und 5^m Höhe ist eine Temperatur von 10°; welche Temperatur entsteht beim Oeffnen der Zwischenthür? Aufl.: 13,6°. — A. 678. Wieviel Wasser von 8° muß man zu 80^{kg} Wasser von 50° mischen, damit eine Temperatur von 20° entstehe. Aufl.: 200^{kg}. — A. 679. Man mengte zu 1000^{kg} Wasser von 0° eine Menge von 600^{kg} Wasser und erwämte dadurch jenes Wasser auf 12°; welche Temperatur hatte das letztere? Aufl.: 32°. — A. 680. Welche Temp. erhält eine Mischung von 12^{kg} Quecksilber von 50° und 12^{kg} Wasser von 12°? Aufl: 13,5°. — A. 681. Man mischt 325^g Schwefelkohlenstoff von 18° mit 400^g Wasser von 20° und erhält eine Mischtemperatur von 19,7°; wie groß ist die sp. W. von Schwefelkohlenstoff? Aufl.: 0,2. — A. 682. Zwei Stoffe, deren Temp. t und t′, und deren sp. W. c und c′ sind, sollen zu n^{kg} gemischt, die Temp. T annehmen; welche Menge muß von beiden genommen werden? Aufl.: Vom ersten $c'n(t' - T) : [c(T - t) + c'(t' - T)]$, vom zweiten $cn(T - t') : [c(T - t) + c'(t' - T)]$. — A. 683. Wasser von 30° und Leinöl von 50° (sp. W. = 0,5) sollen 20^{kg} Mischung von 40° geben; wieviel muß von Jedem genommen werden? Aufl.: $6^2/_3{}^{kg}$ Wasser und $13^1/_3{}^{kg}$ Leinöl. — A. 684. Wie groß ist die sp. W. von Zink, wenn 2^{kg} Zink von 80° in 5^{kg} Wasser von 20° eingetaucht, dessen Temp. auf 22° erhöhen? Aufl.: 0,09. — A. 685. Um wieviel wird Quecksilber von 0° durch ein gleiches Volumen Wasser von 100° erwärmt? Aufl.: 224°. — A. 686. Allgemein zu lösen, wenn die sp. W. der beiden Körper c und c′, ihre sp. G. s und s′ und die Temp. des einen = t ist? Aufl.: $tcs : c's'$. — A. 687. Man legt in eine Höhlung eines Eisblockes eine Silberkugel von 1^{kg} Gewicht und 200° Temp. und erhält dadurch 152^g Wasser von 0°; wie groß ist die sp. W. des Silbers? Aufl.: 0,06. — A. 688. 1^{kg} geschmolzenes Eisen in eine Eisgrube gegossen bringt $1{,}37^{kg}$ Eis zum Schmelzen; wie hoch ist die Schmelztemp. des Eisens? Aufl.: 1200°. — A. 689. Um die Temp. eines Ofens zu bestimmen, bringt man eine Platinkugel von 200^g in denselben und wirft sie nach Erhitzung in 1^{kg} Wasser von 20°, welches hierdurch eine Temp. von 30° annimmt; wie hoch ist die Temp. des Ofens, wenn die sp. W. des Platins = 0,03 308 + 0,0 000 042 t beträgt? Aufl.: 0,2 (t — 30) (0,03 308 + 0 000 042 t) = 10; hieraus t = 1305°. — A. 690. 3^{kg} rothglühendes Eisen schmelzen in dem Calorimeter von Lavoisier und Laplace 2^{kg} Eis; die Temp. der Rothgluth zu finden? Aufl.: 485°. — A. 691. Die sp. W. des Eisens ist genauer = 0,1053 + 0,000071 t; welches ist die Temp. einer weiß glühenden Eisenkugel von 1^{kg}, wenn dieselbe in 16^{kg} Wasser eine Temperatursteigerung von 12 auf 24° erzeugt? Aufl.: 1079,5°. — A. 692. Ein und derselbe elektrische Strom geht durch denselben dünnen Draht durch 1^{kg} Wasser und durch 3^{kg} Quecksilber; das Wasser wird auf 10° erwärmt; um wieviel das Quecksilber? Aufl.: $9^2/_3{}^0$. — A. 693. Verbrennt man in einem Wassercalorimeter 1^g H, so entstehen $34{,}462^c$; um wie viele Grade wird ein gleiches Gewicht Alkohol erwärmt? Aufl.: 68,924°. — A. 694. Wie groß ist die sp. W. des Indiums nach Dulongs Gesetz, wenn das Atomgewicht des Indiums = 113,4 ist? Aufl.: 6,4 : 113,4 = 0,0569. — A. 695. Wie groß ist die sp. W. des Indiumoxydes, wenn dessen Formel In^2O^3 ist, und dieselbe aus den Elementen berechnet wird? Aufl.: 0,085. — A. 696. Wie groß ist dieselbe nach Neumanns Gesetz, wenn für Basen von der Form R^2O^3 das Product ac = 24 ist? Aufl.: 0,086. — A. 697. Wie groß ist die Volumcapacität des Ammoniakgases, aus seinen Elementen berechnet, wenn bei der Verbindung von N mit 3 H das Volumen der Gase zweimal so klein wird? Aufl.: 2, die der Luft = 1 gesetzt. — A. 698. Die sp. Gewichtsw. des Ammoniakgases zu finden, die des Wassers = 1 gesetzt? Aufl.: 0,8. — A. 699. Die sp. Raumw. und Gewichtsw. von Stickoxydul N^2O zu berechnen? Aufl.: 1,5 und 0,2342. — A. 700. Die sp. W. von $Cu\,SO_4$ zu

berechnen, wenn das Product ac für solche Sulfate 26,5 beträgt? Aufl.: 0,196. — A. 701. Die sp. W. von $Cu\ SO_4$ aus der Zusammensetzung zu finden? Aufl.: 0,166. — A. 702. 1kg Alkoholdampf von 80° geht in einem Schlangenrohre durch ein Wassercalorimeter, das 10kg Wasser von 12° enthält und sich dadurch auf 36° erwärmt; wie groß ist die latente Wärme des Alkoholdampfes? Aufl.: $1 \cdot x + 1 \cdot 0{,}5\,(80 - 36) = 10\,(36 - 12)$; hieraus $x = 213$. — A. 703. Durch ein Wassercalorimeter gehen 2kg Aetherdampf von 35°; auf welche Temp. steigen die darin befindlichen 9kg Wasser von 10°? Aufl.: $2 \cdot 90 + 2 \cdot 0{,}5\,(35 - x) = 9\,(x - 10)$; hieraus $x = 30{,}5°$. — A. 704. Zeuner gibt nach der mechanischen Wärmetheorie für die sp. W. von überhitztem Wasserdampf dem bekannten Verhältnisse $c : c'$ folgenden Werth: $1 + {}^1/_3\,T : (T - 38{,}104 \sqrt[4]{p})$; hierin ist $c = 0{,}4805$, die sp. W. bei const. Drucke. Die Gesammtwärme von überhitztem Dampfe ergibt sich dann $= 476{,}11 + c\,(T - 38{,}104 \sqrt[4]{p})$. Hieraus die Gesammtwärme von gesättigtem und überhitztem Dampfe von 5 at zu berechnen? Aufl.: Für gesättigten Dampf = 653c, für überhitzten Dampf = 593c, woraus sich die Vortheilhaftigkeit von überhitztem Dampf ergibt.

6. Die Fortpflanzung der Wärme.

437 Die Fortpflanzung der Wärme geschieht auf 3 Arten: 1. Durch Strahlung; 2. durch Leitung; 3. durch Strömung. Die Strahlung ist das Fortschreiten der Molekularbewegungen eines Körpers auf einen anderen durch Schwingungen oder Wellen des zwischen beiden Körpern befindlichen Aethers; die Wärmestrahlung ist identisch mit der Lichtstrahlung; nur ist der Umfang der Lichtstrahlen kleiner; er beschränkt sich auf Schwingungszahlen von 400 bis 800 Billionen, während die wärmenden Strahlen schon bei 60 Billionen zu beginnen scheinen und sich bis auf 800 Billionen erstrecken, wobei indessen in den letzten 400 Billionen Schwingungszahlen, die bekanntlich das Licht bilden, die Wärmewirkung immer kleiner wird. Die Wärmestrahlung befolgt dieser Identität gemäß die Gesetze der Lichtstrahlen. Durch Wärmestrahlen wird ein Körper nur dann erwärmt, wenn die Schwingungen seines Aethers auf die Körpermoleküle übergehen, wenn also die Wärmestrahlen von dem Körper absorbirt werden. Ist dies nicht der Fall, so schreiten die Aetherwellen ungeschwächt durch den Körper fort, und der Körper verändert seine Temperatur nicht. Dieses Fortschreiten der Wärmestrahlen geschieht mit der Geschwindigkeit, die der Wellenbewegung des Aethers eigenthümlich ist, also mit der Geschwindigkeit des Lichtes. Die Wärmestrahlung geht also durch den leeren Raum, durch die Luft, durch andere Körper mit der Geschwindigkeit des Lichtes, ohne den durchlaufenen Raum oder Körper zu erwärmen.

Daß heiße dunkle und leuchtende Körper Wärmestrahlen aussenden, ohne die durchstrahlten Körper zu erwärmen, erkennt man leicht daran, daß wir die Hitze eines Ofens, dem wir das Gesicht zuwenden, sofort nicht mehr im Gesichte spüren, wenn wir uns umkehren, daß ein dem heißen Ofen zugewendetes Thermometer fällt, wenn man einen Schirm zwischen dasselbe und den Ofen stellt, daß die Sonnenstrahlen wärmend auf die Erde wirken, während die oberen Luftschichten und noch mehr der äußere Weltraum sehr kalt bleiben. Den entscheidenden Nachweis gab Prévost (1811): auf die eine Seite eines Springbrunnens brachte er ein Licht oder ein heißes Eisen, auf die andere ein feines Thermometer, und fand aus dem sofortigen Steigen desselben, daß die Wärmestrahlen durch die stets sich erneuernde und darum unverändert kühl bleibende Wasserschicht sich fortpflanzten. Man hat diesen Versuch noch in der Weise erweitert, daß man durch eine hohle Glaslinse einen dieselbe stets ausfüllenden Strom kalten Wassers gehen ließ und doch mittelst der von der Linse vereinigten Sonnenstrahlen Zunder entzündete. Wenn hiernach die Existenz von Wärmestrahlen nachgewiesen ist, so zeigt uns das Sonnenspectrum, sowie die Spectren irdischer Gluthen, daß dieselben mit den Lichtstrahlen identisch sind, daß es aber außer den leuchtenden Wärmestrahlen auch dunkle Wärmestrahlen gibt (wie es übrigens jeder heiße, nicht glühende Ofen zeigt), daß diese letzteren eine geringere Brechbarkeit, also eine geringere Schwingungszahl, aber eine stärkere Wärmewirkung als die ersteren besitzen. Ueber die Geschwindigkeit der strahlenden Wärme existiren zwar keine entscheidenden Versuche, indessen ist Jedermann bekannt, daß Sonnenlicht und Sonnenwärme immer miteinander auftreten

und verschwinden, daß also die Geschwindigkeit der strahlenden Wärme mit der des Lichtes übereinstimmt.

Die Leitung der Wärme ist das Fortschreiten der Molekularbewegung eines Körpertheiles auf einen anderen, oder eines Körpers auf einen mittelbar oder unmittelbar benachbarten Körper durch Uebergang der Bewegung von einem Molekül zum anderen. Hierbei muß die Bewegung von einem Molekül auf den benachbarten Aether und von diesem auf das folgende Molekül übertragen werden; die Leitung ist also Strahlung von Theilchen zu Theilchen; sie geschieht daher viel langsamer als die Strahlung und nur unter ausnahmsloser Erwärmung aller Zwischentheilchen. Da während dieser langsamen Fortpflanzung der Körper an die Umgebung durch Strahlung und Leitung Wärme verliert, so muß die Temperatur um so niedriger werden, je weiter die Leitung geht. Da außerdem die Moleküle der verschiedenen Körper in der verschiedensten Lage gegen einander sind, so müssen sie auch die Molekularbewegung mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Man unterscheidet daher gute und schlechte Leiter. Die besten Leiter sind die Metalle, die schlechtesten die Luftarten, da die großen Atomzwischenräume sie dem reinen Aetherraume nähern und so die Strahlung überwiegend machen.

Eine Metallstange und eine Holzstange, die man mit den beiden Händen in dieselbe Gluth hält, belehren bald über den Unterschied zwischen guten und schlechten Leitern; daß auch unter den guten Leitern ein bedeutender Unterschied ist, zeigt sich leicht durch Benutzung einer Silberstange und einer Eisenstange; die letztere kann man viel länger in der Hand halten als die erstere. Leicht überzeugt man sich, daß die Temp. der Stangen mit der Entfernung von der Gluth abnimmt, ohne daß indeß ein einfaches Gesetz sofort auffällig wäre. Am interessantesten ist die verschiedene Geschwindigkeit der Leitung mittels einer Thermosäule wahrzunehmen. Man setzt auf dieselbe kleine, ganz gleiche Cylinder von Silber, Kupfer, Eisen, Wismuth, Stein, Holz u. s. w., nachdem sie die Temp. der Säule angenommen haben; es erfolgt dann kein Ausschlag der Nadel. Bringt man aber auf den Cylinder immer ein und dasselbe aus kochendem Wasser genommene Eisenplättchen, so erfolgt der Ausschlag, bedarf aber zu gleicher Größe einer sehr verschiedenen Zeit.

Die Strömung findet statt, wenn flüssige oder Luftmassen an tiefer liegenden Stellen eine höhere Temperatur besitzen als an höher liegenden; vermöge der Ausdehnung werden dann die tiefer liegenden Massen leichter, steigen durch den Auftrieb in die Höhe und bringen so in die höheren Gegenden eine höhere Temperatur.

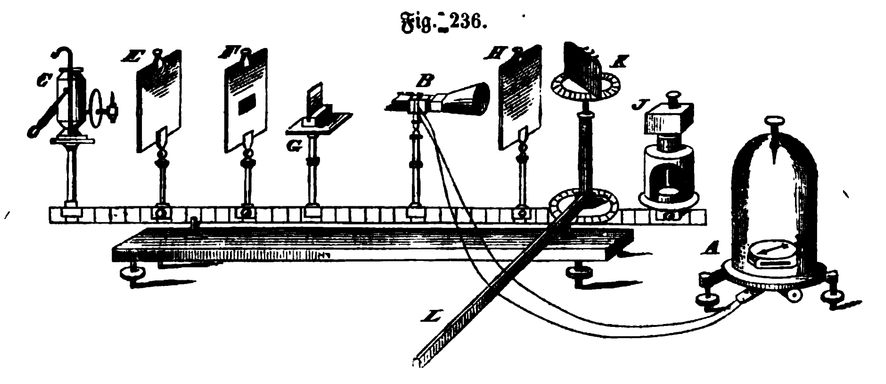
In dieser Weise geschieht das Erwärmen von Wasser durch ein Feuer unter einem Gefäße; die Leitung spielt hierbei nur eine sehr geringe Rolle, denn durch eine noch so starke Erhitzung von oben geht das Erwärmen von Flüssigkeiten nur sehr langsam vor sich. Auch beruht hierauf das Aufsteigen von Luftströmen und die Entstehung der Winde, sowie Perkins) Wasserheizung.

438 **Apparate zum Studium der strahlenden Wärme** (Leslie 1804, Melloni 1831). Die gewöhnlichen Quecksilberthermometer zeigen die Wirkung von Wärmestrahlen nicht im Moment des Eintreffens derselben, sondern erst nach einiger Zeit, weil das Quecksilber einer merklichen Zeit zur Erwärmung und Ausdehnung bedarf; in Folge dessen ist eine genaue Messung geringer Wärmeunterschiede mittels dieses Instrumentes nicht möglich. Leslie construirte nach einer Idee von Rumford das Differentialthermometer, in welchem der thermometrische Stoff Luft ist, die wegen ihrer starken Ausdehnung schon eine geringe Temperaturänderung anzeigt und wegen der geringen Menge der verwendeten Luft diese auch rasch anzeigt. Als aber Nobili die Thermosäule erbaut und mit einem empfindlichen Galvanometer zu dem Thermomultiplicator, dem feinsten Thermometer, verbunden hatte, das Temperaturunterschiede von $1/5000\,^0$ angibt, erfand Melloni den seinen Namen tragenden Apparat, der über die strahlende Wärme eine Reihe neuer Aufschlüsse gab.

Leslies Differentialthermometer oder Thermoskop besteht aus 2 mit Luft gefüllten Glaskugeln, die durch eine 2mal rechtwinkelig umgebogene Glasröhre zu einem Ganzen verbunden sind, und von denen die eine berußt ist; in dem horizontalen Theile der Glasröhre schwebt ein gefärbter Schwefelsäurefaden, dessen Bewegungen die Temperaturänderung

erkennen lassen. — Nobilis Thermosäule ist die bekannte Verbindung von Antimon- und Wismuthstäbchen, die von genau gleicher Länge zu einer einzigen Kette so aneinander gelöthet sind, daß sämmtliche ungeradzahlige Löthstellen in einer Ebene oder Linie, sämmtliche geradzahlige in einer dazu parallelen Ebene oder Linie liegen, und daß die Stäbchen zusammen ein rechtwinkeliges Parallelepiped bilden. Dasselbe ist von einer Fassung eingeschlossen, die an der einen Löthebene in einen langen Trichter übergeht und an der anderen ein Schiebthürchen trägt; eine um die Fassung gelegte Messinghülse trägt die 2 Klemmschrauben, die mit dem ersten Wismuth- und dem letzten Antimonstäbchen in isolirter Verbindung sind. Melloni setzte die Thermosäule B (Fig. 236) verschiebbar auf eine genau getheilte

Fig. 236.



Messingschiene, das Galvanometer A aber in einiger Entfernung von derselben auf; an der Schiene befinden sich noch in ähnlicher Weise verschiedene Wärmequellen, wie Locatellis Lampe C, Leslies Würfel J, ganze Doppelschirme E und H, durchbrochene Schirme F, einfache Tischchen G, ein drehbares, eine Kreistheilung tragendes Tischchen K, das sich auf einem getheilten Kreise und mit dem sich eine zweite Schiene L in einen beliebigen Winkel gegen die erste dreht u. s. w. Das Radiometer s. 393.

Erscheinungen und Gesetze der strahlenden Wärme. Die Emission. **439** Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkte liegt, strahlt bei jeder Temperatur Wärme aus und empfängt bei jeder Temperatur Wärmestrahlen; nimmt er mehr Wärmestrahlen in sich auf, als er aussendet, so steigt seine Temperatur; sendet er mehr Wärmestrahlen aus, als er einnimmt, so sinkt seine Temperatur; sendet er ebenso viele Wärmestrahlen aus als er einnimmt, so bleibt seine Temperatur constant, er befindet sich im beweglichen Gleichgewichte (Prévost 1804.).

Die schwingenden Moleküle jedes Körpers üben einen bewegenden Einfluß auf die ringsum liegenden Aetheratome aus, während umgekehrt die schwingenden Aetheratome stoßend auf die Körpermoleküle wirken; so erklärt sich der stete Austausch der Bewegungen und das früher unerklärliche bewegliche Gleichgewicht. Daß Körper bei jeder Temperatur Wärme ausstrahlen, ergibt sich aus folgenden Erscheinungen: Ein Thermometer von gewöhnlicher Temp. fällt in der Nähe eines Eisstückes von — 5°, weil es von diesem weniger Wärme empfängt als es ausstrahlt. In einem Zimmer von 10° Kälte steigt aber das Thermometer, wenn man ein Stück Eis von — 5° in seine Nähe bringt, weil es dann von diesem mehr Wärme erhält als es ausstrahlt. Steht in einem Raume die Nadel des Thermomultiplicators auf Null und bringt man einen wärmeren Körper in die Nähe der Säule, so bewegt sich die Nadel nach der einen Richtung; bringt man einen kälteren Körper in die Nähe, so geht die Nadel nach der entgegengesetzten Richtung, weil die Säule jetzt mehr Wärme abgibt als sie erhält. In den hellen, langen Sommernächten der tropischen Zone kühlt sich durch Ausstrahlung nach dem kalten Weltraume hin der Boden bis zum Gefrierpunkte ab, was zu der in 420. erwähnten Eisbildung in Indien beiträgt. Hierauf beruht die Entstehung von Thau und Reif.

Unter Ausstrahlung oder Emission versteht man gewöhnlich die Erscheinung, daß ein Körper mehr Wärme aussendet als er einnimmt; umgekehrt unter Absorption die Erscheinung, daß ein Körper mehr Wärme in sich aufnimmt als er

aussendet; das erste findet statt, wenn die Temperatur des Körpers höher ist als die seiner Umgebung, das zweite im entgegengesetzten Falle. Aus dem Princip des beweglichen Gleichgewichtes läßt sich der Satz ableiten, daß bei derselben Temperatur und unter sonst gleichen Umständen ein Körper dieselbe Wärme emittirt, die er absorbirt, kurz daß Absorption und Emission einander gleich sind. Dieser Satz ist nur ein specieller Fall des in 324. betrachteten Kirchhoff'schen Absorptionsgesetzes und besitzt in der Wärmelehre eine besondere Wichtigkeit, weil in vielen Fällen wohl die Absorption, nicht aber die Emission direct untersucht werden kann, aber durch diese Gleichheit mit jener bekannt ist, wenn jene gefunden worden ist.

Die Größe der Emission, die Menge der ausgestrahlten Wärme wächst zunächst mit der Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und seiner Umgebung, sie ist aber dieser Differenz nicht unter allen Umständen proportional, und die Abweichung von dieser Proportionalität ist sehr verschieden. Hierin liegt auch schon, daß die Menge der ausstrahlenden Wärme von der Natur des ausstrahlenden Körpers abhängt; sie ist am geringsten bei Metallen, größer bei organischen Körpern, am größten beim Ruß. Dann hängt die Größe der Emission von der Beschaffenheit der Körperoberfläche ab; lockere, weiche, dunkele Oberflächen strahlen mehr aus als glatte, harte, helle; geritzte Metalle mehr als polirte. Endlich ist nach Clausius (1864) die Emission abhängig von der Natur des umgebenden Mittels. Nach Tyndall scheint die Menge der ausgestrahlten Wärme unabhängig von dem Aggregatzustande zu sein.

Außer der Menge, der Quantität der Wärmestrahlen ist die Art, die Qualität derselben zu untersuchen; die Qualität ist durch die Schwingungszahl bedingt. Strahlen unter 400 Bill. sind dunkel und warm, Strahlen von 400—500 Bill. roth oder gelb und warm; man spricht deßhalb auch von **Wärmefarben** und versteht darunter die verschiedenen Schwingungszahlen des Aethers in ihrer wärmenden Wirkung, ohne indeß an einen ähnlichen Unterschied in der Wärmewirkung zu denken, wie der Farbenunterschied bei der Lichtwirkung auftritt. Doch ist auf diesem Gebiete noch wenig erforscht. Unterhalb 500° strahlen die Körper nur dunkle Wärme aus; ob aber in derselben immer alle Strahlen von 60 bis 400 Bill. enthalten sind oder nicht, ist noch unbekannt. Wenigstens in der Sonnenwärme sind mit Ausnahme von Fizeaus dunkler Stelle alle jene Schwingungszahlen vorhanden. In der Wärme von glühendem Platin fand Desains (1868) ein sehr kleines, leuchtendes Spectrum, aber ein dunkles Wärmespectrum, so groß wie das der Sonne und ununterbrochen. Steinsalz von 150° Wärme emittirt dagegen nach Magnus (1869) nur eine Wärmefarbe, nur eine Schwingungszahl, es ist monothermisch, wie Natriumdampf monochromatisch, homogen von Farbe, ist; Sylvin (KCl) ist nur nahe monothermisch, die anderen Körper aber strahlen bei 150° verschiedene Wärmefarben aus. Bei 500° fangen nach Draper alle Körper an, roth zu glühen, strahlen also 400 Bill. Schw. aus; bei noch höherer Temperatur treten noch höhere Schwingungszahlen hinzu, während sich die niederen mehr verstärken, so daß das Maximum der Wärmewirkung wohl immer im Ultraroth liegt. Wie sich Gase und Dämpfe verhalten, ist in der „Spectralanalyse" betrachtet worden. Aus diesen Thatsachen ist zu entnehmen, wie weit der Satz richtig ist, daß die Wärmefarbe der emittirten Strahlen nicht von der Natur des Körpers, sondern nur von seiner Temperatur abhängt; nach Knoblauch (1847) ist sie auch unabhängig von der Farbe derjenigen Wärme, die den Körper erwärmt hat.

Durch die Emission kühlt sich ein Körper ab, er erkaltet; unter **Erkaltungsgeschwindigkeit** versteht man die Temperaturerniedrigung in einer Minute. Newton hatte aus Versuchen geschlossen, daß dieselbe der Temperaturdifferenz proportional sei; Dulong und Petit aber fanden (1818), daß sie bei gleicher Differenz

bei höherer Temperatur größer sei als bei niederer; da außerdem die Natur des Körpers, seine specifische Wärme, die Größe und Emission seiner Oberfläche, die Leitungsfähigkeit der Umgebung und andere Umstände einwirken, so ist das Erkaltungsgesetz verwickelt und noch nicht gefunden.

Die Beweise der vorausgegangenen Sätze ergeben sich entweder leicht aus den allgemeinen Gesetzen, oder sie sind ganz unmöglich, wenn sie specielle von der uns ihrem Wesen nach unbekannten Stoffverschiedenheit abhängige Eigenschaften betreffen; die Nachweise gehören zu den schwierigen Experimentaluntersuchungen. Leslie stellte (1804) vor einem Hohlspiegel einen mit kochendem Wasser gefüllten Metallwürfel auf, dessen verticale Seiten mit Ruß und den anderen Stoffen überzogen waren, deren Strahlung im Verhältnisse zu Ruß festgestellt werden sollte; in den Brennpunkt des Spiegels wurde die eine, mit Ruß überzogene Kugel des Differentialthermometers gebracht. Er fand die Emissionsvermögen, wenn das von Ruß mit 100 bezeichnet wird, für Papier 98, Harz 96, Siegellack 95, Crownglas 90, Eis 85, Glimmer 80, Graphit 75, rauhes Blei 45, Quecksilber 20, blankes Blei 19, Gold, Silber, Zinn, Kupfer 12. Melloni fand für Bleiweiß ebenfalls 100, für gehämmertes polirtes Silber 10, für gehämmertes geritztes Silber 18, für gegossenes polirtes S. 14, für gegossenes geritztes S. 11, was sich daraus erklärt, daß beim harten Metall das Ritzen weichere Stellen bloslegt, während es beim weicheren Metall die gedrückten Stellen härter macht. Wie eine Rußschicht, so macht auch eine Firnißschicht die Ausstrahlung der Metalle viel größer, und bei beiden Stoffen wächst die Ausstrahlung, wenn man die Schichten bis zu einer gewissen Anzahl vermehrt. Wegen der starken Emission von Ruß kühlen sich berußte Gefäße rascher ab als blanke, und überzieht man Oefen und Ofenrohre mit demselben; dagegen müßte man Wasser- und Luftheizungsröhren blank lassen. — Ueber den Einfluß der Farbe führte man gewöhnlich einen Versuch Franklins an, der verschieden gefärbte Tuche auf Schnee legte und aus dem tieferen Einsinken der dunklen Lappen eine stärkere Absorption und daher auch eine stärkere Emission derselben folgerte; Tyndall zeigte (1861), daß dies nicht als allgemeines Gesetz giltig ist. Er bedeckte die 4 Seiten des Leslie'schen Würfels einmal mit verschiedenfarbigem Sammet, ein anderes Mal mit verschiedenen Farbstoffen und fand die Emission nicht verschieden. Ebenso widerlegte Tyndall die Angabe Mellonis, daß die feinen Pulver gleiche Ausstrahlung hätten; er fand vielmehr in einer Reihe, die mit Steinsalzpulver beginnt und mit Ruß endigt, eine Zunahme von 35 bis 84 in der Größe der Emission. Tyndall untersuchte (1864) die Ausstrahlung der Gase, indem er sie rings um eine heiße Kugel vorbei und dann an dem Trichter der Thermosäule vorbeigehen ließ; er fand die Strahlung der elementaren, permanenten Gase unmerklich, erhielt aber für Kohlenoxyd, Kohlendioxyd u. s. w. Ausschläge von 11—60°; er machte hierbei darauf aufmerksam, daß nicht blos hier, sondern auch bei den festen Körpern die Elemente, Metalle, die geringste Emission haben, sowie unter den Dämpfen Chlor und Brom. Noch ausführlicher sind Tyndalls Untersuchungen der Absorption und dadurch auch der Emission, da diese der Absorption gleich ist; besonders wichtig wäre die von ihm behauptete starke Emission des Wasserdampfes, die auch von Frankland (1864) durch einen vor dem Trichter der Thermosäule aufsteigenden Dampfstrom direct nachzuweisen gesucht, von Magnus aber bestritten wurde; Diese Untersuchungen sind näher bei der Absorption zu besprechen; bei Gelegenheit derselben ordneten sich die Flüssigkeiten hinsichtlich der Ausstrahlung genau so wie ihre Dämpfe und zeigten dieselbe Emission wie diese, mochten diese nun zugeführte Wärme oder durch ihre eigene Verdichtung entstehende Wärme ausstrahlen, für welch letztere Erscheinung Tyndall den Namen dynamische Ausstrahlung anwendet. Auch bei den Gasen zeigte die dynamische Ausstrahlung Uebereinstimmung mit der gewöhnlichen. — Clausius folgerte aus seiner Theorie den neuen Satz, daß die Emissionsstärken in den verschiedenen Mitteln in umgekehrtem Verhältnisse stehen zu den Quadraten der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Strahlen in den Mitteln, einen Satz, den Quintus Icilius (1866) für Wasserstoff und Kohlendioxyd experimentell bestätigte. — Ueber die Ausstrahlung rauher Oberflächen kommt Magnus in seiner kurz vor seinem Tode (1870) geschriebenen letzten Arbeit zu dem Schlusse, daß die veränderte Emission derselben nicht der veränderten Härte, sondern dem Brechungsverhältnisse der Substanz für die Wärmestrahlen zugeschrieben werden müsse; die Metalle hätten einen größeren B.-E., deßhalb trete bei ihnen bald totale Reflexion der von ihnen herauskommenden Wärme ein, und sie könnten daher nur wenig ausstrahlen; die Ritzen und Rauhigkeiten dagegen böten soviel Ecken und Spitzen, daß die totale Reflexion nur eniger stattfinden könne.

Die Nachweise für die Qualität der Wärmestrahlen geschehen auf 2 Arten, durch die Spectralanalyse und mittels Durchstrahlungsversuchen. Bei dem ersten Nachweise muß das Spectrum mittels eines Steinsalzprismas erzeugt werden, weil alle anderen Stoffe einen

Theil der durch sie dringenden Strahlen absorbiren, während das Steinsalz nahezu alle Wärmefarben gleich gut durchläßt; die einzelnen Theile des Spectrums werden dann mit einer linearen Thermosäule untersucht. Die zweite Methode wird in der Lehre von der Diathermanität besprochen.

440 2. Die Wärmestrahlen gehen von einem warmen Körper nach allen Richtungen, sind in einem isotropen Medium gerade Linien und wirken im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung (Melloni).

Diese Gesetze gehen sowohl aus der Wellenlehre, als auch aus der Identität der Wärme- und Lichtstrahlen hervor. Der erste Satz ist einfach dadurch nachgewiesen, daß die Thermosäule in beliebiger Stellung rings um einen wärmeren Körper immer eine Bewegung der Nadel nach demselben Sinne hervorbringt, der zweite Satz dadurch, daß die Nadel zurückkehrt, wenn man in die Gerade zwischen der Säule und der Wärmequelle einen Schirm schiebt, der dritte dadurch, daß bei 2, 3, 4facher Entfernung der Säule von einer größeren, flächenartigen Wärmequelle, z. B. einer großen Metallplatte, die Nadel ihre Stellung nicht ändert; es gelangt dann in den Trichter die Wärme von einem 4, 9, 16mal größeren Kreise; da aber die Wirkung dieselbe geblieben ist, so ist die Wärmewirkung eines gleichen Flächentheiles 4, 9, 16mal kleiner geworden. Mit Leslies Differentialthermometer trifft dieser Versuch nicht zu, weil bei größerer Entfernung Strahlen mit kleineren Ausfallswinkeln auf dasselbe treffen und die Wirkung verstärken. Es ist nämlich die Wirkung der Wärmestrahlen wie die der Lichtstrahlen nach Leslie (1804) dem Cosinus des Ausstrahlungswinkels proportional, was nach Fourier (1817) davon herrührt, daß die Strahlung nicht blos von der Oberfläche, sondern auch von inneren Punkten bis zu einer gewissen Tiefe geschieht (284.).

441 3. Reflexion und Brechung der Wärmestrahlen. Treffen Wärmestrahlen auf einen Körper, so wird gewöhnlich ein Theil derselben absorbirt, in Körperwärme verwandelt, ein anderer Theil wird unregelmäßig reflectirt oder diffundirt; wieder ein anderer wird regelmäßig so reflectirt, daß der einfallende und der reflectirte Strahl mit dem Einfallslothe in einer Ebene liegen und gleiche Winkel einschließen, und endlich wird manchmal ein Theil durchgelassen und dabei gebrochen nach den bekannten beiden Brechungsgesetzen, nach welchen der einfallende und der gebrochene Strahl mit dem Einfallslothe in einer Ebene liegen und die Sinusse des Einfallswinkels und des Brechungswinkels in dem constanten Verhältnisse stehen, das bekanntlich Brechungsexponent genannt wird (Melloni 1835).

Diese Gesetze gehen sämmtlich in bekannter Weise aus der Wellentheorie der strahlenden Wärme hervor und sind vielfach nachgewiesen, am schärfsten mit Mellonis Apparat. Wird auf das drehbare Tischchen K (Fig. 236) ein Spiegel gestellt, so daß die von der Wärmequelle J ausgehenden Strahlen mit dem Spiegellothe einen Winkel x machen, der an der oberen Kreistheilung abzulesen ist, so muß die zweite Schiene L mit der ersteren einen an der unteren Theilung abzulesenden Winkel 2 x einschließen, wenn die Nadel einen Ausschlag geben soll. Wird auf das drehbare Tischchen ein Prisma gestellt und aus dem Einfallswinkel und dem Brechungsexponenten der Brechungswinkel berechnet, so erfolgt der Ausschlag nur, wenn die Stellung der Schiene L diesem Winkel entspricht. Doch waren die Gesetze auch schon durch ältere Versuche dargethan. Mariotte stellte schon um 1680 zwei kugelförmige Hohlspiegel in ca 20′ Entfernung einander gegenüber auf und entzündete ein im Brennpunkte des einen befindliches Stückchen Zunder durch Strahlen glühender Kohlen, die sich in einem Körbchen am Brennpunkte des anderen befanden; bei diesem Versuche ist das Zusammenfallen des Brennpunktes der Lichtstrahlen mit dem der Wärmestrahlen zu beobachten. Es gelten also die Hohlspiegelgesetze, die ja auf den Reflexionsgesetzen beruhen, für Licht und Wärme in gleicher Weise. Ein interessanter Versuch, zugleich zum Nachweise der Gesetze 1. besteht darin, daß man in den einen Brennpunkt Eis, in den anderen ein Thermometer oder eine Thermosäule bringt und an derselben ein rasches Sinken der Temperatur bemerkt. Berühmte Hohlspiegelversuche sind: Mariotte entzündete Pulver mit einem Hohlspiegel von Eis; Tschirnhausen erbaute 1687 einen Hohlspiegel von 6′ Durchm., mit welchem er Silber und Kupfer schmolz, Dachziegel verglaste; Buffon stellte Hunderte von ebenen Spiegeln so zusammen, daß sie einen kugelförmigen Spiegel bildeten, und entzündete getheertes Holz in Entfernungen von Hunderten von Fußen; vielleicht benutzte Archimedes ähnliche Einrichtungen, als er (nach Zonaras) Schiffe aus der Entfernung in Brand steckte. Wissenschaftlich interessant ist die erste Diamantverbrennung in dem Brennpunkte eines großen Hohlspiegels durch die Akademie zu Florenz (1694). In ähnlicher Weise ist auch die Geltung der Brechungsgesetze für Wärmestrahlen indirect seit

älterer Zeit nachgewiesen dadurch, daß die convexen Linsen Wärmestrahlen gerade so vereinigen wie Lichtstrahlen. Strepsiades schmilzt schon in Aristophanes' Wolken mit einem Brennkrystall die in Wachs gegrabene Klageschrift weg. 1793 entzündete man in England mit einer Eislinse Pulver. Bernieres experimentirte (1774) mit einer dreifüßigen Alkohollinse, die sich leicht mit der Sonne drehen ließ, und mittels deren man Eisen schmelzen und selbst Platin anschmelzen konnte.

Die regelmäßige Reflexion geschieht von glatten Flächen, die Diffusion von rauhen Flächen. Melloni hat dieselbe nachgewiesen, indem er auf das Tischchen K statt eines Spiegels eine Scheibe aufstellte, die einerseits mit Bleiweiß, anderseits mit Ruß bedeckt war; die erste Seite ergab sofort beim Auftreffen von Wärme einen starken Ausschlag der Nadel, die letzte nicht. Bleiweiß diffundirt also stark, Ruß sehr schwach. Nähere Untersuchungen von Knoblauch (1847) ergaben, daß die Körper die verschiedenen Wärmefarben ebenso in verschiedener Menge diffundiren wie die verschiedenen Lichtfarben, daß z. B. weiße Körper die hellen Strahlen stärker als die dunkeln, schwarze alle Strahlen gleichmäßig gering, Metalle dagegen alle Strahlen gleichmäßig stark diffundiren; die Metalle sind demnach in Bezug auf die Wärme, was Weiß in Bezug auf Licht ist, sie sind wärmeweiß.

442 4. **Verschiedene Brechbarkeit der Wärmestrahlen.** Die Strahlen verschiedener Wärmequellen von verschiedener Temperatur, sowie auch verschiedene Strahlen einer Wärmequelle haben eine verschiedene Brechbarkeit, ebenso wie die verschiedenen Lichtfarben verschiedene Brechbarkeit besitzen; die geringste Brechbarkeit haben dunkle Wärmestrahlen von niederer Temperatur, eine größere hat die Wärme von leuchtenden Wärmequellen, und zwar ist sie um so größer, je höher die leuchtende Gluth ist (Melloni 1835, Forbes 1838). Man nennt, wie schon erwähnt, die Strahlen von verschiedener Schwingungszahl oder die verschieden brechbaren Arten von Wärme **Wärmefarben.**

Die verschiedene Brechbarkeit ist eine Folge davon und hat zur nothwendigen Voraussetzung, daß die verschiedenen Wärmefarben eine verschiedene Schwingungszahl besitzen. Melloni untersuchte die Wärmestrahlen eines heißen Kupferbleches, einer über einer Spiritusflamme glühenden Platinspirale und einer Locatelli'schen Lampe; er fand die Brechung für die erste Quelle am kleinsten, für die letzte am größten; indessen ergab sich auch schon, daß die Lampe verschiedene Wärmefarben ausstrahlte, da die Säule auch bei einer größeren Verschiebung noch Ausschläge erzeugte. Forbes bestimmte nach Wollastons Methode die Brechungsexponenten, indem er den Grenzwinkel der totalen Reflexion aufsuchte, dessen Sinus bekanntlich dem B.-E. gleich ist; er mußte ein Steinsalzprisma anwenden, weil andere durchsichtige Stoffe die dunkeln Wärmestrahlen absorbiren, das Steinsalz aber alle Wärmefarben durchläßt. Seine Resultate stimmen mit denen Mellonis; auch er fand, daß die verschiedenen Wärmequellen zwar eine Wärmefarbe vorwiegend, aber auch noch andere und zwar von benachbarter Brechbarkeit ausstrahlen, daß also die Wärme der meisten Quellen, ähnlich wie beim Lichte, ein Wärmefarbengemisch ist. Dasselbe ist schon seit längerer Zeit von der Sonnenwärme bekannt. (Siehe 313.) Nach Magnus (1869) ist nur das Steinsalz **monothermisch**; es ist der einzige Körper, der nur eine Wärmefarbe ausstrahlt. Nach Kirchhoffs Absorptionsgesetz kann es dann auch nur eine Farbe absorbiren, woraus sich die schon angeführte Thatsache erklärt, daß das Steinsalz alle Wärmefarben durchläßt, allerdings mit Ausnahme der einzigen, die es nach Magnus ausstrahlt. Man sieht hieraus, wie wesentlich die Frage ist über die Fähigkeit der Körper, Wärme durchzulassen, die in der Lehre vom Lichte ihr Analogon in der Durchsichtigkeit hat. Ein Körper läßt nur diejenigen der in ihn eindringenden Wärmestrahlen durch, die er nicht absorbirt; während also die Absorption der Emission gleich ist, ist sie zur Durchlassung reciprok.

443 5. **Die Absorption** (Melloni 1835, Tyndall 1862—66). Ein Theil der Wärmestrahlen, der Aetherwellen, die in einen Körper eintreten, wird gewöhnlich in Molekularbewegung umgewandelt, indem die Aetheratome ihre Schwingungen den Körperatomen mittheilen; diese Wärmestrahlen haben ihre Existenz als solche verloren, sie sind absorbirt worden und haben hierdurch den Körper erwärmt. Nach Kirchhoffs Absorptionsgesetz werden diejenigen Strahlen absorbirt, deren Aetherschwingungen mit den Körperschwingungen übereinstimmen und nach Lommels Erweiterung auch die höhere und die tiefere Octave; die übrigen bleiben Aetherbewegung, schreiten als solche durch den Körper und treten auf der anderen Seite

desselben als Wärmestrahlen heraus. Da die Absorption der Emission gleich ist, so gelten für erstere dieselben Gesetze wie für letztere, doch müssen dieselben auch direct abgeleitet und nachgewiesen werden, welch letzteres gewöhnlich einfacher als bei der Emission geschehen kann. Die Absorption ist bei glänzenden, stark reflectirenden, sowie bei stark diffundirenden Körpern gering; Metalle haben die geringste, Ruß die stärkste Absorption. Die Absorption ist verschieden nach der Farbe der Wärme; während Ruß alle Wärmefarben gleich gut absorbirt, verschluckt Bleiweiß vorwiegend die dunkeln und nur wenige helle, und die Metalle absorbiren alle in gleich geringem Maße. Von den durchsichtigen Körpern absorbiren die farblosen meist die dunkeln Strahlen, die gefärbten diejenigen, welche eine andere Farbe haben. Die Absorption der Luftarten fand Tyndall bei den permanenten elementaren Gasen fast Null, dagegen viel beträchtlicher bei anderen Gasen und bei Dämpfen; die dynamische Absorption stand bei den verschiedenen Gasen und Dämpfen in demselben Verhältnisse wie die gewöhnliche; ebenso zeigten die Flüssigkeiten in ihrer verschiedenen Absorption nicht blos dasselbe Verhältniß wie ihre Dämpfe, sondern auch dieselbe Größe, woraus geschlossen wurde, daß die Absorption unabhängig vom Aggregatzustande sei, ein Satz, den Desains (1867) durch neue Versuche bestätigte.

Leslie (1804) und Melloni (1835) machten zuerst Bestimmungen über die Größe der Absorption oder das Absorptionsvermögen, Leslie mit Würfel, Hohlspiegel und Differentialthermometer, Melloni mit einem Kupferblech, dessen eine, berußte Seite einer Wärmequelle, und dessen andere mit der zu untersuchenden Substanz bedeckte Seite der Thermosäule zugewendet war. Beide fanden das Absorptionsvermögen von Ruß gleich groß für alle Wärmefarben und größer als das aller anderen Stoffe; sie setzten dasselbe gleich 100 und fanden dann, daß z. B. Tusch für Locatelli's Lampe das Vermögen 96, für glühendes Platin 95, für Kupfer von 400° 87, für Kupfer von 100° 85 hat; ebenso ergab sich die Absorption von Bleiweiß für die 4 Quellen = 53, 56, 89, 100, von Gummilack 43, 47, 70, 72, von Metall 14, 13,5, 13, 13, woraus ersichtlich ist, daß verschiedene Körper gegen dieselbe Wärmefarbe und ein Körper gegen verschiedene Wärmefarben eine verschiedene Absorption besitzt; Bleiweiß absorbirt mehr dunkle als helle Strahlen, wie es mehr helle als dunkle diffundirt, die Metalle absorbiren und diffundiren die verschiedenen Farben in gleicher Menge. Neuere Untersuchungen von Delaprevostaye und Desains für Metalle zeigen größere Verschiedenheiten; Stahl z. B. hat hiernach für Sonnenwärme die Absorption 0,42, für Argands Lampe 0,34, für Locatellis Lampe 0,175, Platin für die 3 Quellen 0,39, 0,30 und 0,17, wobei das Vermögen von Ruß = 1 gesetzt ist. Die starke Absorption von Ruß benutzt man, indem man die Kugeln genauer Thermometer, die Flächen der Thermosäule u. s. w. durch einen Rußüberzug sehr empfindlich macht. Auch in der Kleidung, der Hautfarbe macht sich die Absorption geltend; auf ihr beruht die Wirkung der Glasbeete in Gärten; die durch die Glasscheibe gegangene Sonnenwärme wird in dunkle Wärme verwandelt und kann dann wie die Erdwärme nicht mehr durch das Glas hinaus.

Eine ausgedehnte Reihe seiner Untersuchungen über die Absorption der Gase, Dämpfe und Flüssigkeiten liegt von Tyndall vor. Derselbe schloß die Gase und Dämpfe in längere, weite Röhren ein, die mit Steinsalzplatten geschlossen waren, und an deren einer Seite sich die Wärmequelle befand, während an dem anderen Ende die Thermosäule stand, die demnach auf ihrer der Röhre zugewendeten Seite die durch die Röhre gegangene Wärme empfing. Indem Tyndall durch eine zweite Wärmequelle auf der zweiten Seite der Thermosäule die Wirkung der ersten compensirte, gab er dem geringsten Ueberschusse auf der einen Seite Gelegenheit zu starker Wirkung, und bestimmte durch diese „Compensationsmethode“ die Menge der durch Gase und Dämpfe absorbirten dunkeln Strahlen. Ist die Absorption z. B. für Luft und die elementaren permanenten Gase bei 1″ Druck = 1, so ist sie für Cl = 60, Stickoxyd = 1590, Schwefelwasserstoff = 2000, Ammoniak = 7260, Schwefeldioxyd = 8800; bei Benutzung mehrerer gefüllten Röhren ergab sich ein geringerer Einfluß der zweiten, dritten Röhre, so daß die „Wirkung der Summe kleiner ist als die Summe der Wirkungen.“ Auffällig ist hierbei die geringere Absorption von Cl und Br trotz ihrer tiefen Farbe und die verhältnißmäßig starke Wirkung der chemischen Verbindungen. Die absorbirende Wirkung von Dämpfen verglichen mit Luft unter 1″ Druck ist für Schwefelkohlenstoff 62, Benzol 242, Schwefeläther 870, Essigäther 1195. Für Wohlgerüche ergibt sich die Absorption unter dem Luftdrucke 30 bis 372 mal größer als die der Luft, für Ozon je nach der Temperatur 30 bis 136 mal größer als die des reinen Sauerstoffs. — Läßt man

in die Röhren Gase und Dämpfe einströmen, so erzeugen diese durch ihre Verdichtung Wärme, während sie beim Auspumpen Wärme verbrauchen; Tyndall unterscheidet danach dynamische Ausstrahlung und dynamische Absorption; beim Schwefelkohlenstoff erzeugt z. B. die erstere einen Ausschlag von 14°, die letztere von 6°, beim Essigäther 70° und 43°. — Eine längere, noch nicht ganz entschiedene Discussion zwischen Tyndall und Magnus erweckte die Angabe des ersteren, daß der Wasserdampf dunkle Strahlen theilweise absorbire, daß z. B. der atmosphärische Dampf an einem Tage von besonderer Trockenheit 10% der Ausstrahlung der angewendeten Wärmequelle in sich aufnehme. Tyndall schloß hieraus, daß mindestens 10% der von der Erde ausgehenden Wärme durch Wasserdampf der untersten 10′ dicken Luftschicht aufgefangen würden, und erklärte dies von bedeutendem Einflusse auf die Meteorologie, indem die Ausstrahlung des Wasserdampfes eben so groß sei als seine Absorption; durch diese eigene Ausstrahlung erkläre sich die große Menge des tropischen Regens, die Bildung der Haufwolken als Capitäle aufsteigender Luftsäulen, die große Kälte auf den Höhen, weil diese den Dampf condensiren, und weil der Dampf hier noch rascher durch Ausstrahlung seine Wärme verliere, dann die rasche nächtliche Abkühlung in trockenen, hohen Gegenden, die Regen ohne Wolken u. s. w. Magnus, dessen Versuche über die Absorption der Gase dieselben Resultate wie Tyndalls Arbeiten ergaben, fand dagegen, daß feuchte Luft keine nennenswerth größere Absorption besitze als trockene, und erklärte die in den Röhren Tyndalls beim Einblasen feuchter Luft stattfindende Wärmeabsorption dadurch, daß durch sogenannte Vaporhäsion an den Wänden sich Dampf condensire und daß diese Feuchtigkeit die Wärme in Beschlag nehme. Desains führte noch zuletzt für Tyndall den Satz vor, daß die Absorption sich mit dem Aggregatzustande nicht ändere, daß also Wasserdampf ebenso wie Eis und Wasser den dunkeln Strahlen den Durchgang versperre, dieselben absorbiren müsse; dem entsprechend zeigten seine Versuche mit einem scharfen Sonnenspectrum und einem genauen Galvanometer, daß selbst die äußersten dunkeln Sonnenwärmestrahlen noch durch Wasserschichten von 2mm Dicke gingen, also schon die von Wasser absorbirbaren Strahlen in der Luft verloren hätten; außerdem zeige das Sonnenspectrum in dem leuchtenden Theile vom Wasserdampfe herrührende Absorptionsstreifen, folglich möchten auch solche in dem unsichtbaren Spectrum vorhanden sein; dagegen enthalte das Spectrum von glühendem Platin viele durch Wasser absorbirbare Strahlen, und könne doch nicht angenommen werden, daß die Abwesenheit solcher Strahlen im Sonnenspectrum eine specielle Eigenschaft der Sonne sei. Hoorweg hat nun (1875) die Versuche Tyndalls wiederholt und zwar im Freien, ohne die bedeckende Röhre und ohne eine Schutzdecke über dem untersuchten Gefäße; er fand, daß Tyndall durch Vaporhäsion die Absorption überschätzte und daß Magnus wegen der Kürze seiner Versuchsröhren sie unterschätzte; er glaubt, daß 100m Luft noch nicht die Absorption vollbringen, die Tyndall von 10′ erwartete.

Einen weiteren Nachweis für seine Angabe über den Wasserdampf glaubte Tyndall durch seine Untersuchungen der Absorption der Flüssigkeiten zu erhalten. Als Wärmequelle benutzte er eine elektrische Lampe, d. i. eine in einen Glasballon eingeschlossene Platinspirale, welche durch einen mittels Rheostat und Tangentenbussole constant gehaltenen elektrischen Strom glühend gemacht wurde; die Flüssigkeiten wurden in eine Steinsalzzelle eingeschlossen, und die Thermosäule durch einen heißen Compensationswürfel sehr empfindlich gemacht. Es ergab sich auch hier, daß die Absorption bis zu einer gewissen Grenze mit der Dicke der Schicht erst rasch, dann immer langsamer wächst; so beträgt sie z. B. für eine 0,02″ dicke Wasserschicht 80,7%, bei 0,04″ 86%, bei 0,07″ 88,8%, bei 0,14″ 91%, bei 0,27″ 91%. Das Wasser zeigte die stärkste Absorption, dann kommt Alkohol mit 67% bei 0,02″, dann die Aetherarten, zuletzt Schwefelkohlenstoff mit nur 5,5%. Als nun die Absorption von solchen Dampfmengen derselben Flüssigkeiten untersucht wurden, welche den Flüssigkeitsmengen proportional waren, ordneten sich die Dämpfe nach ihrer Absorption genau in dieselbe Reihe wie die Flüssigkeiten; Schwefelkohlenstoff bildete das kleinste Ende, am anderen Ende standen die Aetherarten und der Alkohol. Wasserdampf für sich konnte nicht untersucht werden, weil er sich zu leicht condensirt; da nun in der Reihe der Flüssigkeiten das Wasser auf den Alkohol folgt, so müsse dies auch in der Reihe der Dämpfe der Fall sein, woraus, so schließt Tyndall, jedoch nicht ganz berechtigt, abermals die starke Absorption von Wasserdampf folge. — Tyndall untersuchte dann noch die Absorption von Wärme verschiedener Wärmequellen und fand, daß sie um so kleiner wird, je heller die Strahlen werden; für eine kaum sichtbare Platinspirale ist z. B. die Absorption des Schwefelkohlenstoffdampfes = 6,5%, für eine rothglühende Platinspirale 4,7%, für eine weißglühende 2,9, für eine nahe dem Schmelzp. 2,5%, für den Leslie'schen Würfel 6,6, für die hellleuchtende Gasflamme 9,8, für den Bunsen'schen Brenner 6,2%; da aus den ersten Zahlen ersichtlich ist, daß durchsichtige Stoffe die dunkeln Strahlen stärker absorbiren als die hellen, so folgt aus den letzten Zahlen, daß die hellleuchtende Gasflamme und der Bunsen'sche Brenner viele dunkle Strahlen enthalten.

444 6. **Die Diathermanität und die Thermochrose.** Die Körper scheiden sich in Bezug auf den Durchgang der Wärmestrahlen in wärmedurchlassende oder **diathermane** Körper und in solche, welche Wärmestrahlen nicht durchlassen, oder **adiathermane** Körper. Die diathermanen Körper können eingetheilt werden in thermochroische Körper, die nur bestimmten Wärmefarben von bestimmter Brechbarkeit den Durchgang gestatten und daher auch thermisch gefärbte Körper genannt werden können, und in thermisch nicht gefärbte Körper, welche alle Wärmefarben durchlassen. Die Eigenschaft, Wärme überhaupt durchzustrahlen, nennt man **Diathermanität**, die Eigenschaft, bestimmte Wärmefarben durchzulassen, nennt man **Diathermansie** oder **Thermochrose** (Melloni 1834). Die durchsichtigen Körper lassen meistens die leuchtenden Wärmestrahlen durch, schwächen aber die dunkeln mehr oder weniger; eine Ausnahme bilden Steinsalz und Sylvin (Chlorkalium von Staßfurt), welche allen Wärmestrahlen den Durchgang gestatten, den dunkeln wie den hellen, mit Ausnahme (nach Magnus 1869) der wenigen Strahlen, die sie selbst aussenden. Die undurchsichtigen Körper lassen keine leuchtenden Wärmestrahlen durch, aber einige in hinreichend dünnen Schichten, wie Ruß, schwarzer Glimmer, schwarzes Glas, Jodlösung in Schwefelkohlenstoff die dunkeln Wärmestrahlen. Farbig durchsichtige Körper sind nur diatherman für Wärme von ihrer eigenen Farbe, und ertheilen daher einem beliebigen Strahlenbündel mittels des Durchganges ihre eigene Wärmefarbe. Noch mehr als Steinsalz sind die trockenen, elementaren Gase diatherman für alle Wärmefarben; andere Gase und Dämpfe lassen dagegen gewisse Strahlen nicht durch (Tyndall 1861—66). Der Aggregatzustand eines Körpers scheint ohne Einfluß auf die Menge der durchgehenden Strahlen zu sein.

Ein Körper läßt diejenigen Strahlen durch, die er an seiner Oberfläche weder reflectirt und diffundirt, noch in seinem Inneren absorbirt; da die Absorption eine Verwandlung der Aetherschwingungen in Körperschwingungen ist, so wird der Körper durch die absorbirten Strahlen erwärmt, die durchgelassenen aber ändern seine Temperatur nicht. Läßt man Sonnenstrahlen oder Strahlen einer anderen Wärmequelle durch Wasser gehen und dann durch Eis, so schmilzt das Eis nicht, weil das Wasser die Strahlen schon absorbirt hat, die das Eis erwärmen könnten. Die durchsichtigen Körper absorbiren die dunkeln Wärmestrahlen, lassen also die hellen durch; die farbig-durchsichtigen Körper absorbiren alle Strahlen mit Ausnahme derjenigen ihrer Farbe, die sie deßhalb durchlassen; die dunkeln Körper absorbiren die hellen Strahlen, lassen deßhalb höchstens dunkele durch. Die Körper absorbiren also die Wärmestrahlen von derselben Farbe wie die der von ihnen verschluckten Lichtstrahlen, sie schwächen (Franz 1857) Licht und Wärme in ganz gleichem Maße, worin eine Bestätigung der Identität liegt. Wir nennen die Strahlen Licht, wenn sie auf unser Auge, Wärme, wenn sie auf das Gefühl und das Thermometer wirken. — Die Absorption, aus welcher die Diathermanität resultirt, geschieht meist schon in den ersten Schichten, so daß bis zu einer gewissen Grenze die Absorption mit der Dicke des durchlaufenen Körpers wächst, über diese Grenze hinaus aber die Dicke keinen Einfluß mehr auf die Menge der durchgehenden Strahlen ausübt; das Strahlenbündel hat nach dem Gange durch die absorbirende Schicht die Wärmefarbe des Körpers gewonnen, geht also ohne weiteren Verlust durch diesen, wie durch eine zweite Platte desselben Körpers.

Die Untersuchungen über die Diathermanität sind sehr zahlreich. Masson und Jamin (1850) prüften die verschiedenen Sonnenwärmestrahlen und fanden, daß die verschiedenfarbigen leuchtenden Wärmestrahlen durch Steinsalz, Wasser, Glas, Alaun in ziemlich gleicher Menge gehen, daß durch farbige Gläser weder andersgefärbte Licht- noch Wärmestrahlen, dagegen Licht- und Wärmestrahlen von der Farbe des Glases in gleicher Menge dringen, und daß endlich die dunkeln Sonnenstrahlen fast ungeschwächt durch Steinsalz, stark geschwächt durch Glas und Alaun, und gar nicht durch Eis gelassen werden. — Melloni (1835 u. f.) untersuchte die Wärmestrahlen der Locatelli'schen Lampe, der glühenden Platinspirale, eines auf 390° erhitzten Kupferbleches und der 4 Seitenflächen von Leslies Würfel. Durch Steinsalz gingen 92% der Strahlen aller 4 Quellen (der Verlust wurde durch Reflexion erklärt); durch Spiegelglas gingen nur resp. 39, 24, 6, 0%, durch Gyps 14, 5, 0, 0%, durch Alaun 9, 2, 0, 0%, durch Eis 6, 0,5, 0, 0%. Aus Mellonis Tabelle, von welcher hier einige Beispiele stehen, gehen verschiedene, meist schon erwähnte Folgerungen hervor; zunächst, daß die Wärme jeder Quelle aus verschiedenen Wärmefarben besteht, daß

auch die leuchtenden Wärmequellen hauptsächlich dunkle Strahlen aussenden, und daß nach dem Durchgange die Färbung des Strahlenbündels geändert, der Farbe des durchstrahlten Stoffes gleich geworden ist; sodann daß die durchsichtigen Körper mit Ausnahme des Steinsalzes die dunkeln Wärmestrahlen stark absorbiren, die leuchtenden aber durchlassen; ferner daß Wärmequellen niederer Temp. nur Strahlen geringer Brechbarkeit aussenden, daß mit der Temp. die Menge der dunkeln Strahlen zunimmt, daß aber auch leuchtende Strahlen sich zumischen, deren Brechbarkeit sich mit der Temp. erhöht; endlich daß von den durchsichtigen festen Körpern Steinsalz der diathermanste, Eis der adiathermanste ist. Zu ähnlichen Resultaten gelangte Knoblauch (1846); Tyndall (1862) zeigte die Färbung der Strahlenbündel durch den Durchgang; durch Alaun, chromsaures Kali oder Gyps gegangene Strahlen gehen zu 90, 71 und 91% durch eine zweite Platte von demselben Stoffe; der Verlust ist der Reflexion zuzuschreiben. Ebenso kann man ein mächtiges Bündel durch eine Linse concentrirter Strahlen auf die Glaskugel eines Differentialthermometers leiten, ohne daß sich die flüssige Säule rührt; denn die Strahlen, welche von dem Glas und der Luft absorbirt werden könnten, sind schon von der Linse herausgenommen worden, gehen also wirkungslos durch die Kugel. „Wir benutzen gläserne Ofenschirme, weil sie das freundliche Licht des Kaminfeuers durchlassen, während sie die Wärme abhalten.“ Auf den Gipfeln der hohen Eisberge geht man in eisig kalter Luft, wenn auch die Sonne heiß auf den Scheitel brennt.

Wie die verschiedenen Wärmefarben in verschiedener Art durchgelassen, absorbirt, gebrochen und diffundirt werden, so haben sie auch eine ungleiche Reflexion. De la Provostaye und Desains (1849) zeigten, daß von der Wärme einer Locatelli'schen Lampe, je nachdem sie durch Glas oder Steinsalz gegangen war, verschiedene Mengen von Spiegelmetall, Silber, und Platin reflectirt werden; dasselbe fanden sie für die einzelnen Farben der durch ein Prisma zerlegten Wärme einer Lampe, die von Metallen reflectirt wurden. Ausgedehntere Forschungen hierüber wurden von Knoblauch (1845) und Magnus (1869) angestellt: Wärme von erhitztem Steinsalz ausgestrahlt, wird vom Flußspath im Betrage von 28—30% reflectirt, während derselbe von anderen Wärmequellen 6—10% reflectirt. Silber reflectirt 83—99%, Glas 5—14%, Flußspath 6—10% von anderen Wärmequellen; von Sylvinwärme reflectirt der Flußspath 15—17%.

7. Die **Polarisation** und die **Doppelbrechung** der Wärmestrahlen. Die Polarisation der Wärmestrahlen durch Reflexion wurde zuerst genauer von Knoblauch (1848) nachgewiesen; ein schwarzer Glasspiegel in einem Heliostat reflectirte die Sonnenstrahlen nach und nach unter verschiedenen Winkeln; dann gingen sie durch ein Nicol'sches Prisma auf eine Thermosäule, so daß durch Drehen des Nicol die Menge der polarisirten Strahlen gefunden werden konnte; es zeigte sich die reflectirte Wärme schon bei einem Einfallswinkel von 25° einigermaßen polarisirt, doch nahm die Polarisation bis 35° zu und dann wieder ab, die stärkste Polarisation findet also bei dem Polarisationswinkel 35° statt wie bei dem Lichte. Melloni und Forbes zeigten (1835) die Polarisation durch einfache Brechung; in den beiden Enden einer metallenen Röhre saßen drehbare Säulen von Glimmerblättchen; am einen Ende stand eine glühende Platinspirale, deren Wärmestrahlen durch zwei Steinsalzlinsen parallel gemacht wurden, am anderen Ende eine Thermosäule; bei gekreuzter Stellung der Glimmersäule war die Wärmewirkung am geringsten. — Magnus hatte bei der Untersuchung einer glühenden Platinplatte gefunden, daß deren Wärme theilweise polarisirt ist; da nun hier keine andere Ursache der Polarisation möglich ist als die Brechung beim Austritte an der Oberfläche, so mußte ein Theil der Wärme aus dem Inneren kommen, woraus Magnus schloß, daß auch in athermanen Körpern die Wärme sich durch transversale Schwingungen, und zwar der Körper- und Aetheratome fortpflanze. Um diese Folgerung auch für die gewöhnliche dunkle Körperwärme möglich zu machen, zeigte Magnus (1868), daß auch dunkle, von einem 100° warmen Bleche verschiedener Metalle oder von heißem Glase ausgestrahlte Wärme theilweise polarisirt sei, während von rauhem Glase oder von Tuch keine Polarisation zu erkennen war; da bei diesen Stoffen eine regelmäßige Brechung nicht möglich ist, so war die Folgerung von Magnus gerechtfertigt, daß die Polarisation von Brechung herrühre, und Magnus glaubte sich hierdurch zu dem Schlusse berechtigt, daß auch die Wärmeleitung in transversalen Schwingungen bestehe. **445**

Auch die Doppelbrechung der Wärme wurde von Knoblauch (1848) direct nachgewiesen, indem er ein sehr schmales, vom Heliostat reflectirtes Sonnenstrahlenbündel durch ein Kalkspathrhomboeder gehen ließ und dessen andere Seite mittels einer linearen Thermosäule untersuchte; er fand dort zwei wärmere durch einen kalten Raum getrennte Stellen.

8. Die Interferenz und die Beugung der Wärmestrahlen. Fizeau und Foucault erzeugten (1847) mittels zweier unter sehr stumpfem Winkel gegen einander geneigten Spiegel breite Interferenzstreifen und fanden die Temperatur in dem mittleren, hellen Streifen = 36°, in den beiden seitlichen, dunkeln Streifen nur = 20°. Knoblauch **446**

benutzte (1859) ein Interferenzprisma und eine lineare Thermosäule, die eine genaue seitliche Verschiebung zuließ, und beobachtete Unterschiede von 1° in den Ausschlägen der Nadel. Die Beugung eines Strahlenbündels ohne Interferenz fand ebenfalls Knoblauch (1847); er ließ ein Strahlenbündel durch einen scharfen, schmalen Spalt treten und senkrecht zu demselben eine lineare Thermosäule langsam vorbeigehen; das Strahlenbündel fand sich dann breiter als es vermöge der geradlinigen Begrenzung hätte sein müssen. Auch die Beugung mit Interferenz durch ein Steinsalzgitter wurde von Knoblauch (1859) beobachtet; in der Mitte erzeugte seine Thermosäule einen Ausschlag von 17°, in dem ersten Seitenspectrum 3,5°, dazwischen 0°. — Endlich hat Knoblauch (1867) sogar die Interferenzfarben der strahlenden dunkeln Wärme, also die Interferenz der polarisirten Wärme in einer äußerst sorgfältigen Untersuchung studirt und die Erscheinungen als ganz übereinstimmend mit denen des Lichtes erkannt. Wird z. B. ein Strahlenbündel durch 2 Nicols und eine dazwischen geschaltete Krystallplatte geleitet, so geht die Wirkung mittels der Drehung des einen Nicol durch die Farblosigkeit in die complementäre über. Hiernach ist denn die Identität der Wärmestrahlen mit Licht über allen Zweifel erhoben.

447 **Erscheinungen und Gesetze der Wärmeleitung.** 1. Feste Körper. Die Leitungsfähigkeit der festen Körper ist sehr verschieden; Silber ist der beste Wärmeleiter; bezeichnet man die Leitungsfähigkeit desselben mit 100, so ist sie nach Wiedemann und Franz (1853) für Kupfer 73,6, für Gold 53,2, für Messing 23,1, für Zink 19, für Zinn 14,5, für Eisen 11,9, für Blei 8,5, für Platin 8,4, für Neusilber 6,3, für Wismuth 1,8. Diese Zahlen sind nur Verhältnißzahlen; man hat auch die absoluten Wärmemengen zu bestimmen gesucht, welche durch Platten von 1^{cm} Dicke und 1^{qcm} Querschnitt bei einer constanten Temperaturdifferenz von 1° in 1 Minute gehen und hat dieselben Leitungscoëfficienten k genannt; man erhält die mittleren Werthe derselben ungefähr, wenn man die Wiedemann'schen Zahlen mit 0,9031 multiplicirt; so ist k für Silber 90,31, Kupfer 66,47, für Eisen 10,74, für Platin 7,58, für Wismuth 1,62, für Quecksilber 1,06 Wärmeeinheiten. Diese Wärmeeinheit ist jedoch nicht 1°, sondern der 1000ste Theil derselben, also die Wärme, die 1^g Wasser um 1° erwärmt. Ist die Dicke eines Körpers $= d$, und sind die Temperaturen an beiden Enden constant a und b, so ist die durch den Querschnitt gehende Wärmemenge $= k(a-b):d$. Da bei der Voraussetzung constanter Temperatur an der einen Seite aus der Luft, deren Temperatur $= c$ sei, eine gleiche Wärmemenge in den Körper übergehen und am anderen Ende aus dem Körper in die Luft von der Temperatur c' austreten muß, so ist $k(a-b):d = h(c-a) = h'(b-c')$, worin h und h' die Coëfficienten der äußeren Leitung genannt werden.

Die mathematische Theorie der Leitung ist sehr verwickelt; etwas vereinfacht wird dieselbe durch die eben gemachte Voraussetzung, daß die fortgeleitete Wärme der Temperaturdifferenz proportional sei; man erhält dann durch höhere Rechnung nach Biot (1816), daß in einer am einen Ende erhitzten Stange die Temperaturen nach einer geometrischen Reihe abnehmen, wenn die Abstände von der Wärmequelle in einer arithmetischen Reihe wachsen, woraus sich nach Despretz (1828) der Satz ergibt: die Wärmeleitungsfähigkeiten verhalten sich wie die Quadrate der Entfernungen, für welche die Wärmedifferenzen mit der Luft einander gleich sind. Nach diesem Satze machten Despretz, sowie Wiedemann und Franz ihre Bestimmungen der Wärmeleitungsfähigkeit. Nur in Körpern mit gleichem Gefüge nach allen Seiten ist auch die Wärmeleitung nach allen Richtungen dieselbe, so z. B. in den Krystallen des regulären Systems. Nach Senarmont (1849) ist sie bei Krystallen der anderen Systeme nur in den Ebenen gleicher Axen gleich groß, z. B. im quadratischen und hexagonalen System in allen zur Hauptachse senkrechten Richtungen, in allen übrigen dagegen größer oder kleiner. Im regulären System bilden alle Punkte, auf denen die von einem Punkte ausgehende Wärme zu gleicher Zeit und in gleicher Stärke anlangt, eine Kugel; bei den zwei folgenden genannten Systemen ist diese isotherme Fläche ein Rotationsellipsoid, bei den drei letzten Systemen ein dreiachsiges

Ellipsoid. Knoblauch fand (1859), daß auch die Hölzer in der Richtung der Fasern die Wärme besser leiten als in der dazu senkrechten Richtung, und Tyndall entdeckte (1862) kleine Unterschiede zwischen der Leitung in der Richtung senkrecht zu den jährlich abgelagerten Holzschichten und parallel zu denselben.

Die ältesten Bestimmungen der Wärmeleitung wurden mit dem Ingenhouß'schen Blechkasten gemacht, in dessen eine Seitenfläche durch Korke die zu untersuchenden Stäbe eingesteckt und inwendig durch eingegossenes heißes Oel erwärmt wurden; die äußeren Stabtheile waren mit Wachs überzogen, das durch die fortgeleitete Wärme um so rascher schmolz, je größer die Leitung war. Indessen ist diese Methode sehr unzuverlässig, schon deßhalb, weil auch die specifische Wärme hier mitwirkt und die Wirkung einer guten Leitung durch eine hohe sp. W. ganz aufgehoben werden kann. — Biot hat sein Gesetz nachgewiesen, indem er in Stäbe in gleichen Entfernungen kleine Vertiefungen anbrachte, diese mit Quecksilber ausfüllte und kleine Thermometer in dieselben setzte. Nach dem Satze von Despretz bestimmte dann derselbe mittels dieser Methode die Wärmeleitung verschiedener Stoffe, und Wiedemann und Franz schlugen dasselbe Verfahren ein, nur machten sie genauere Messungen mittels der Thermosäule.

Senarmont überzog Krystallplatten mit einer dünnen Wachsschicht und erwärmte sie von der Mitte aus, indem er in eine dort angebrachte Oeffnung das Ende eines heißen Drahtes einsetzte; das Wachs schmolz dann in der Figur eines Kreises oder einer Ellipse, woraus die oben angegebenen Folgerungen gezogen wurden. Knoblauch schlug ähnliche Methoden für Hölzer ein, und Greiß untersuchte zuletzt eine große Reihe anderer flächenartigen organischen Körper und fand meistens elliptische Abschmelzungen. Tyndall erwärmte Holzwürfel durch einen vom elektrischen Strome erhitzten Rost von Platindraht und maß die Erwärmung auf der anderen Seite durch einen Thermomultiplicator.

Die schlechtesten festen Leiter sind die lockeren organischen Stoffe, weil sie in ihren Lücken mit Luft erfüllt sind, die der schlechteste Leiter überhaupt ist, und die in diesen Fällen sich wegen ihrer Eingeschlossenheit nicht durch Strömung erwärmen kann. Gegenstände, die man vor dem Erfrieren schützen will, umwickelt man mit Stroh oder dergl.; unsere Kleider und Betten halten uns warm, weil sie aus schlechten Leitern bestehen und daher unsere Wärme nicht hinauslassen; die Asche hat wegen ihrer schlechten Leitung vielfache Verwendung in Mauerwerken, Schornsteinen, Geldschränken, calorischen Maschinen u. s. w.; Vorthüren und Vorfenster bringen eine schlecht leitende Luftschicht zwischen warme Zimmer und kalte Räume; der schlecht leitende Schnee schützt Pflanzen vor dem Froste; die gute Leitung des Drahtgehäuses der Davy'schen Sicherheitslampe läßt die Flammenhitze nicht nach außen; an hölzernen Handgriffen heißer Thüren u. s. w. verbrennt man sich nicht; schlechte Leiter fühlen sich bei gleicher Kälte weniger kalt an als gute, und bei gleicher Hitze weniger warm; Quecksilber von 50° bringt dieselbe Hitzeempfindung durch Berührung hervor als Wasser von 60°, Holz von 80 und Luft von 120°; daher konnten Blagden und Chantrey, zwei englische Maler, es längere Zeit in einem Backofen aushalten, dessen Hitze die Siedhitze des Wassers überstieg, wobei allerdings der durch Verdunstung entstehende Wärmeverbrauch das Fleisch und die Haut schützte. Pulver sind ebenfalls schlechte Wärmeleiter, daher der Nachtheil des Kesselsteines, der eine Pulverkruste darstellt.

448 2. Flüssige und luftartige Körper. Gewöhnlich geschieht die Wärmeverbreitung in flüssigen und luftartigen Körpern durch Strömung, denn die Leitung derselben ist äußerst gering; nach Despretz (1839) ist die Leitungsfähigkeit des Wassers 100 mal so klein als die des Kupfers; nach Paalzow (1868) bilden die Flüssigkeiten folgende Reihe: Quecksilber, Wasser, Kupfervitriol, Schwefelsäure, Zinkvitriol, Kochsalzlösung, in welcher die erste am besten, die letzte am schlechtesten leitet. Die erste genauere Zahlenbestimmung ist von Angström (1864), der für Quecksilber $k = 1{,}06$ fand. Nach dessen Methode bestimmte Lundquist (1869) die Leitungsfähigkeit verschiedener Flüssigkeiten; es ergab sich für Wasser $k = 0{,}0933$, so daß hiernach die Leitungsfähigkeit des Wassers 700 mal so klein als die des Kupfers wäre. Die neueste Bestimmung ist von Winkelmann (1874); dieselbe ergab übereinstimmend mit der vorerwähnten für Wasser $k = 0{,}0924$; nicht viel kleiner ist die Leitung von Alkohol, $k = 0{,}0903$, dagegen größer für Kochsalzlösung $k = 0{,}1605$.

Die ersten Untersuchungen der Flüssigkeiten geschahen an Gefäßen, die von oben durch heißes Oel oder brennenden Weingeist erwärmt wurden, und an denen seitlich mehrere Thermometer mittels Korkstöpsel in die Flüssigkeit eingeführt waren; bei einem Versuche

von Despretz dauerte es 30 Stunden, bis Wasser von oben her gleichmäßig erwärmt war. In einem schief gehaltenen Probirgläschen kann man oben Wasser kochen, während ein unten liegendes Eisstückchen nicht schmilzt. Angström und Lundquist verfuhren nach einer mathematisch begründeten Methode, die auch von Forbes und Neumann mit Modificationen für feste Körper angewendet wurde; ein Stab oder eine flüssige Säule von so großer Länge, daß das eine Ende immer die Temperatur der Umgebung behielt, wurde am anderen Ende abwechselnd erhitzt und abgekühlt, und nach bestimmten Zeiten wurde an zwei gegebenen Stellen des Stabes die Temperatur gemessen und darnach k berechnet. Winkelmann verfuhr nach einer ganz neuen und vielversprechenden Methode von Stefan (1872): Ein Hohlcylinder mit doppelten Wänden von Messing enthält in seinem weiten Mantel die zu prüfende Flüssigkeit und im Inneren Luft, welche ein Luftthermometer bildet, indem ein doppelt umgebogenes Glasrohr aus dem Inneren in ein Quecksilbergefäß geht. Wird nun der Cylinder ganz in schmelzenden Schnee gebettet, so kühlt sich durch die Leitung der Flüssigkeit diese und die Innenluft ab; das Steigen des Quecksilbers gewährt die Mittel zur Berechnung von k.

Die Schwierigkeit der Untersuchungen erklärt die Verschiedenheit der Angaben. Während nach Guthrie alle Lösungen besser leiten sollen als Wasser, gibt Paalzow das Wasser als den besten Leiter an, und steht dasselbe nach Lundquist zwischen Kochsalz- und Zinkvitriollösung. Nach Winkelmann ist die Leitung von Wasser kleiner als die von Lösungen und größer als die von Alkohol und Glycerin.

Das Leitungsvermögen der Metalle soll nach Wiedemann und Franz für Elektricität und Wärme dasselbe sein. Nun ändert sich die elektrische Leitung mit der Temperatur; folglich müßte nach dem Wiedemann'schen Satze eine analoge Aenderung der Wärmeleitung mit der Temperatur stattfinden. Gegenüber dieser Folgerung hat Lorenz (1872) die Ansicht zu begründen gesucht, daß bei reinen und gleichartigen Metallen die Leitungsfähigkeit von der Temperatur unabhängig sei, und daß die beobachtete Veränderlichkeit von thermoelektrischen Strömen herrühre, die durch Ungleichartigkeit der Stäbe entständen. Herwig hat nun (1874) allerdings für Quecksilber, das die Bedingung der Gleichartigkeit am besten erfüllt, eine vollkommene Constanz der Leitung zwischen 40 und 160° durch zahlreiche Versuche nachgewiesen.

Noch Rumford hatte die Meinung, daß die Flüssigkeiten keine Wärmeleiter seien und sich nur durch Strömung erwärmen könnten. Die mechanische Wärmetheorie hätte diese schon durch Experimente beseitigte Ansicht unmöglich zugeben können, da nach derselben die Moleküle auf einander stoßen und sich daher ihre lebendige Kraft gegenseitig mittheilen müssen; in den Flüssigkeiten sind zwar die Moleküle weit von einander entfernt, so daß die Strahlung hier überwiegend werden kann; dafür sind aber immer zahlreiche Moleküle in fortschreitender Bewegung, bis sie gegen andere stoßen, und daher diesen Bewegung mittheilen; dasselbe muß in Luftarten der Fall sein, da hier alle Moleküle in fortschreitender Bewegung bis zum Zusammenstoße begriffen sind. Obwohl zwar wegen der großen Abstände der Moleküle die Fortpflanzung der Wärme durch den Aether, die Strahlung überwiegend sein muß, so muß doch nach der mechanischen Wärmetheorie auch eine Wärmeleitung in den Gasen stattfinden, und zwar muß sie im Wasserstoff, dessen Moleküle die größte Geschwindigkeit haben, am größten sein. Clausius berechnete gleich anfangs, daß die Leitung des Wasserstoffs 7 mal so stark als die der Luft sein müsse.

Die **Luftarten** hielt man früher für Nichtleiter; man erklärte die Wärmeverbreitung in denselben durch Strömung; daß aber die Erkaltung eines und desselben Körpers in verschiedenen Gasen nicht gleich rasch erfolgt, daß z. B. ein von einem elektrischen Strome durchflossener Platindraht in Kohlendioxyd schon glüht, wenn er in Wasserstoff noch dunkel bleibt, veranlaßte Magnus (1861) zu genaueren Forschungen, welche für den Wasserstoff eine allerdings geringe Leitungsfähigkeit ergaben und auch für die übrigen Gase eine, aber noch geringere Leitung unverkennbar machen. Maxwell berechnete sodann rein theoretisch mit Hilfe der molekularen Geschwindigkeiten der Gase und der mittleren Weglänge der Moleküle die Leitungsfähigkeit der Luft und fand, daß dieselbe gleich dem 3500ten Theil von der Leitung des Eisens und innerhalb gewisser Grenzen unabhängig vom Drucke sei; diese auf Grund der mechanischen Wärmetheorie unternommene Voraussagung wurde durch die Versuche von Stephan (1872) bestätigt. Neue Versuche von Kundt und Warburg (1875) ergeben nahezu dieselben Zahlenresultate, bestätigen das Gesetz über den Druck, zeigen aber, daß bei einer an Luftleere grenzenden Verdünnung die Wärmeleitung unmerklich klein ist.

Magnus erwärmte seinen Gasraum, in welchem ein gegen Strahlung geschütztes Thermometer steckte, durch siedendes Wasser von oben, und fand, daß Wasserstoff eine höhere Temperatur empfing als der leere Raum, woraus dessen Leitungsfähigkeit resultirte, daß aber andere Gase eine niedrigere Temperatur hatten als der leere Raum; daraus folge aber nicht, meinte Magnus, die Nichtleitung dieser Gase, sondern nur, daß sie von der seitlichen Strahlung mehr absorbiren als der leere Raum. Vergleicht man nun die bekannte Absorption mit diesen beobachteten Temperaturen, so ergeben sich Verschiedenheiten, welche nur von Leitung herrühren können und diese für Ammoniak und ölbildendes Gas am größten zeigen. Stephan fand nach seiner schon erwähnten Methode für Luft $k = 0{,}003348$, so daß die Leitungsfähigkeit des Kupfers ($k = 66{,}47$) 20000 mal und die des Eisens ($k = 10{,}74$) 3400 mal so groß als die der Luft ist. Die Versuche von Kundt und Warburg ergaben, daß der Leitungscoëfficient des Kohlendioxyds 0,59 und der von Wasserstoff 7,1 mal so groß als der der Luft ist. Diese Uebereinstimmung der Versuchsresultate mit den Rechnungsresultaten der mechanischen Wärmetheorie, das Eintreffen der theoretisch vorausgesagten Erscheinungen der Art und Größe nach bildet eine solche Stütze der neueren Wärmelehre, daß kaum mehr an der Wahrheit derselben gezweifelt werden kann.

Achte Abtheilung.

Der Magnetismus.

Magnetische Anziehung und magnetische Richtkraft. An manchen Orten der Erde findet sich ein Eisenerz, das die Eigenschaft hat, kleine Eisentheile anzuziehen und festzuhalten; die Mineralogen nennen das Erz Magneteisenstein, die Physiker sagen, das Erz sei ein natürlicher Magnet, und nennen überhaupt jeden Körper einen Magnet, der die Kraft hat, Eisen anzuziehen und festzuhalten. Diese Kraft kann auch Stahlstäben dauernd verliehen werden, die man alsdann künstliche Magnete nennt; sie erhalten ihren Magnetismus dadurch, daß sie an natürlichen oder anderen künstlichen Magneten gestrichen werden; insbesondere benutzt man hierzu die stärksten Magnete, die man künstlich erzeugen kann, die Elektromagnete, d. i. schmiedeeiserne Stäbe, welche durch Elektricität vorübergehend zu Magneten gemacht wurden. 449

1. Hängt man an einem Faden ein Stück Eisen auf und nähert ihm einen Magnet, so bewegt sich das Eisen durch die Luft nach dem M. hin und haftet fest an demselben; hängt man einen M. an einem Faden auf und nähert ihm ein Stück Eisen, so bewegt sich der M. durch die Luft zu dem Eisen und haftet an demselben. 2. Bringt man andere Körper in die Nähe eines M., so ist diese Erscheinung nicht merkbar. 3. Bringt man zwischen den M. und das Eisen Papier, Glas, Holz, so findet die Anziehung dennoch statt; dagegen wird die Wirkung durch Eisen geschwächt. 4. Legt man einen M. in Eisenfeilspäne, so häufen sich dieselben nicht überall gleich stark an; an zwei Stellen, bei Stäben gewöhnlich an den Enden, hängen die meisten Späne, zwischen beiden Stellen nimmt die Menge der Späne sehr rasch ab und ungefähr in der Mitte zwischen beiden Stellen hängen keine Späne. Ebenso wird ein an einem ungedrehten Seidenfaden hängendes Eisenkügelchen von jenen zwei Punkten aus größter, von anderen aus immer geringerer Entfernung angezogen, von dem mittleren Zwischenpunkte gar nicht. Aus diesen Versuchen ergeben sich folgende Sätze:

1. Magnet und Eisen ziehen einander an. 2. Andere Körper als Eisen bringen mit dem gewöhnlichen Magnete keine anziehende Wirkung hervor. 3. Die Anziehung geschieht nicht blos durch die Luft, sondern auch durch andere Körper, mit Ausnahme des Eisens. 4. Die Anziehung eines Magnetes ist an zwei Stellen, die man die Pole nennt, am stärksten; zwischen den Polen nimmt die Anziehung mit der Entfernung immer mehr ab, und ist an der mittleren Zwischenstelle, Indifferenzzone genannt, gar nicht vorhanden. Die Magnetpole liegen bei einem Stabe zwar nahe, aber nicht ganz an den Enden.

Das Gesetz 2. gilt durchaus nicht ohne Grenzen; erreicht ein M. eine gewisse Stärke, so wirkt er nicht blos auf Eisen, sondern auch auf die meisten anderen Körper; sie werden von den beiden Polen entweder angezogen oder von beiden Polen abgestoßen; die von beiden Polen angezogenen Körper werden paramagnetisch, die von beiden Polen abgestoßenen Körper diamagnetisch genannt. Am stärksten paramagnetisch ist demnach das Eisen und eisenhaltige Körper; dann folgen Nickel und Kobalt; am stärksten diamagnetisch ist das Wismuth; selbst viele Flüssigkeiten und Gase sind entweder paramagnetisch oder diamagnetisch.

Außer der Anziehung hat ein Magnet noch eine zweite Grundeigenschaft, die nämlich, bei freier Beweglichkeit eine bestimmte Lage anzunehmen. Hängt man einen Magnetstab mittels eines ungedrehten Seidenfadens frei auf, oder setzt man eine Magnetnadel, d. i. ein dünnes Magnetstäbchen, gewöhnlich von der Form einer sehr lang gestreckten Raute, mit den Polen an den spitzen Enden, mittels eines Achathütchens auf die Spitze eines aufrechten Messingständers, so nehmen der Stab oder die Nadel eine ungefähr nordsüdliche Lage an, d. h. der eine, und zwar immer derselbe, Pol richtet sich ungefähr nach Norden, der andere zeigt nach Süden. Diese Eigenschaft nennt man die Richtkraft des Magnetes; der nach Norden zeigende Pol wird Nordpol, der entgegengesetzte Südpol, die gerade Verbindungslinie beider Pole die Achse des Magnetes genannt. Bei genauer Messung wird ersichtlich, daß der Nordpol eines Magnetes meist nicht genau nach Norden zeigt, sondern etwas von dem Meridian abweicht; der Winkel, den die Magnetnadel mit dem Meridian macht, wird Declination, und die durch die Nadel gelegte Verticalebene magnetischer Meridian genannt. Ebenso ist ein vollkommen frei in seinem Mittelpunkte aufgehängter Stab nicht horizontal gerichtet, wie es die nach der zweiten Methode aufgesetzte Nadel wegen ihrer Aufhängung sein muß, sondern das Nordende des Stabes richtet sich bei uns nach unten; der Winkel, den die Magnetnadel mit der Horizontalen einschließt, wird Inclination genannt. Die Declination beträgt z. B. in Berlin jetzt 12° westlich, die Inclination 67°. Genauere Messungen an verschiedenen Orten haben gezeigt, daß sowohl die Declination wie die Inclination nach Ort und Zeit verschieden sind. Die Declination ist in Europa, Afrika und auf dem atlantischen Ocean westlich, in Amerika, dem großen Ocean und Asien östlich. In der nördlichen Erdhälfte neigt sich der Nordpol, in der südlichen der Südpol nach unten. Genaueres in der Lehre vom Erdmagnetismus.

Die Richtkraft des M. hat wichtige Anwendungen im Compaß und in der Boussole. Der Schiffscompaß hat eine Cardanische Aufhängung und ein etwas tiefes, mit Blei ausgegossenes Gehäuse, damit dasselbe bei den Schwankungen des Schiffes sich immer selbst in die verticale Lage stelle. Auf einem Papierkreise sind die 32 Weltgegenden, die sogenannte Windrose, verzeichnet, das Papier ist auf ein Glimmerblättchen geklebt, und dieses ist so mit der Nadel fest verbunden, daß die Mittelpunkte zusammenfallen, und daß die Nadel in die Mittellinie der Windrose fällt, daß also die Windrose sich immer mit der Nadel dreht. Das Instrument ist in der Nähe des Steuermannes aufgestellt, und an dem Compaßgehäuse werden zwei Striche so angebracht, daß ihre Verbindungslinie in diejenige Richtung der Windrose fällt, welche eingeschlagen werden soll; der Steuermann hat dann nur dafür zu sorgen, daß der Kiel des Schiffes jener Linie parallel und der Winkel jener Linie mit der Nadel derselbe bleibt. Bei den Landcompassen ist die Nadel gewöhnlich frei von dem getheilten Kreise; man kann die Weltgegenden eines Ortes mittels desselben nur dann genau bestimmen, wenn man die Declination des Ortes kennt. Ist dieselbe z. B. 18° westlich, so stellt man das Gehäuse so, daß die Nadel um 18° des über oder unter derselben angebrachten getheilten Kreises nach Westen hin abweicht; dann geben die Weltrichtungen der Windrose des Compasses auch die des Ortes an In der Boussole, die zu Winkelmessungen am Himmel und auf der Erde benutzt werden kann, ist außer dem getheilten Kreise ein Diopterlineal oder ein Fernrohr mit Fadenkreuz vorhanden; man stellt sich im Scheitel des Winkels auf, visirt in der Richtung der beiden Schenkel und subtrahirt die beiden Angaben der Nadel, so hat man die Winkelgröße. Der Compaß erfährt durch Eisenmassen, die sich auf Schiffen befinden, besonders also auf eisernen Schiffen, eine Ablenkung oder Deviation, welche, um richtige Angaben zu erzielen, von der Compaßangabe abgerechnet werden muß. Nach Poisson berechnet man auf der Kriegsmarine für

jedes Schiff den Einfluß der Eisenmassen und berichtigt darnach die Compaßbeobachtungen. Auf Handelsschiffen wird die Wirkung des Schiffeisens durch Magnete und Eisenmassen, die in die Nähe des Compasses gelegt werden, compensirt. Eine ähnliche Correctur muß auch in Gebäuden, in denen sich magnetische Observatorien befinden, bei genauen Messungen vorgenommen werden, da nach Gherardi (1863) selbst manchmal die Back- oder Ziegelsteine magnetisch sind. — Die Richtkraft der Magnete kann auch schon an auf Wasser schwimmenden Nähnadeln beobachtet werden.

Die erste Entdeckung und die Namensabstammung des Magnetes verlieren sich im Dunkel der Sage. Nach Plinius (hist. nat. 36. 25.) stammt der Name von dem Hirten Magnes, dessen Schuhnägel und Stabspitze am Berge Ida festhafteten (clavis crepidarum et baculi cuspide haerentibus, cum armenta pasceret); nach Aristoteles soll der Name von Magnesia am Berge Sipylus nordöstlich von Smyrna stammen, wo indeß nach Quenstedt nur Talk vorkommt. Die Richtkraft soll von den Chinesen schon seit ältester Zeit auf Reisen benutzt worden sein. Im Occident des großen Continents wurde sie nach den Angaben der Historiker zuerst im 14. Jahrhundert von Flavio Gioja aus Amalfi zur Schifffahrt verwendet, doch scheint sie schon früher bekannt gewesen zu sein. Die ägyptischen Priester setzten ihren Göttern Augen ein, die sich immer nach Osten, dem astrologischen Paradiese richteten; Are Frode, ein skandinavischer Schriftsteller des 11. Jahrh., erzählt, daß Floke Bilgerdarson, ein berühmter Wikinger, im Jahre 868 ausgezogen sei, um Gardarsholm (Island) aufzusuchen, und daß er als Wegweiser drei Raben mitgenommen habe, weil damals die Seefahrer in den nördlichen Ländern noch keinen „Leitstein" gehabt hätten; im 12. Jahrhundert wird in einem provençalischen Gedichte von Guyot eine Nadel beschrieben, die auf Stroh im Wasser schwimmend sich nach Norden wende. — Der Magneteisenstein, der chemisch Eisenoxyduloxyd $= Fe_2O_3 + FeO = Fe_3O_4$ ist, findet sich nicht blos in Lagern, sondern in ganzen Gebirgsstöcken im Gneiß und Glimmerschiefer; doch ist Deutschland nicht reich daran, um so reicher ist der Norden: die Vorkommnisse von Arendal, Utöen, Danemora in Schweden sind berühmt und geben das beste Eisen, den englischen Stahl; der Taberg bei Jönköping am Wettersee ist ein 400′ hoher Eisenkoloß. Im Ural ist der Wissokaja Gora bei Nischne-Tagilsk eine löcherige Magneteisenmasse von 1800′ L., 1500′ Br. und 250′ H.; in der Kupferregion am Lake Superior finden sich mehrere tausend Fuß mächtige Magneteisenberge. Doch ist das frisch aus dem Inneren gebrochene Erz nur schwach magnetisch, stärker sind die rostigen Randstücke.

Wirkung zweier Magnete auf einander (Georg Hartmann zu Nürnberg 1543). Da sich der eine Pol eines M. immer wieder nach Norden richtet, wenn man ihn auch nach Süden dreht, und ebenso der andere immer wieder nach Süden, wenn man ihn auch nördlich stellt, so muß schon die Vermuthung entstehen, daß in den beiden Hälften des M. eine Verschiedenheit stattfinde, obwohl dieselben das Eisen in ganz gleicher Weise anziehen und festhalten. Um diese Verschiedenheit zu finden, läßt man zwei M. auf einander wirken, z. B. zwei auf Spitzen horizontal schwebende Nadeln, sogenannte Declinationsnadeln. Man bemerkt dann, daß die Nordpole der beiden Nadeln sich von einander entfernen, daß ebenso die beiden Südpole von einander weichen, daß dagegen der Nordpol der einen und der Südpol der anderen Nadel sich einander nähern und dann einander mit einer gewissen Kraft festhalten. Hieraus folgt das magnetische Grundgesetz: Gleichnamige Pole stoßen einander ab, ungleichnamige Pole ziehen einander an. 450

Man nennt daher die gleichnamigen Pole auch feindliche, die ungleichnamigen aber freundliche. Indessen findet diese Wirkung zweier M. auf einander nicht blos an den Polstellen, sondern auch an den ihnen benachbarten Stellen in gleicher Weise, aber mit geringerer Stärke statt, und zwar um so geringer, je näher sie der Indifferenzzone liegen. Die ganze Hälfte des Nordpoles wirkt in derselben Weise, ebenso die ganze Hälfte des Südpoles; beide Hälften aber wirken in entgegengesetzter Weise, weil die eine anzieht, was die andere abstößt, während alle Nordhälften aller Magnete in gleicher Weise wirken, da sie alle dasselbe abstoßen und auch dasselbe Andere anziehen, und während auch alle Südhälften in gleicher Weise wirken, da sie ebenfalls dasselbe anziehen und dasselbe Andere abstoßen. Da nun die in dem M. enthaltene Eigenschaft oder Kraft Magnetismus heißt, so muß man auch sagen, daß es zwei Arten von Magnetismus gibt, den Magnetismus der Nordhälfte und den der Südhälfte, Nordmagnetismus und Südmagnetismus, welche entgegengesetzt wirken und für welche das Grundgesetz allgemein lautet: Gleichnamige Magnetismen stoßen einander ab, ungleichnamige Magnetismen ziehen einander an.

Man benutzt diese Gesetze, um zu finden, ob und wie eine Stelle eines Eisenkörpers

magnetisch ist. Man nähert diese Stelle zuerst dem einen, dann dem anderen Pole einer Nadel; zieht sie beide Pole an, so ist das Eisen an jener Stelle nicht magnetisch; zieht sie den Nordpol an und stößt den Südpol ab, so ist die Stelle südmagnetisch; zieht sie den Südpol an und stößt den Nordpol ab, so ist die Stelle nordmagnetisch. Auch kann die Abstoßung zur Entscheidung allein genügen, die Anziehung aber nicht.

Bringt man eine Nadel in die Nähe eines Poles eines sehr starken M., so verläßt sie ihre Stellung und stellt sich so, daß jenem Pole ihr ungleichnamiger Pol so nahe wie möglich kommt, kurz daß sie nach jenem Pole gerichtet ist; und stellt man in dessen Nähe viele Nadeln auf, so stellen sie alle ihre ungleichnamigen Pole in dessen größtmögliche Nähe, sie richten sich alle nach demselben hin. Da ebenso auf der nördlichen Halbkugel der Erde die Nordpole aller Magnete, die von stärkeren Magneten unabhängig sind, nach einem Punkte im Norden hinweisen, und auf der südlichen Erdhälfte die Südpole aller Magnete nach einem Punkte im Süden hinweisen, so muß man schließen, daß die Erde selbst ein großer Magnet ist, daß sie in der Nordhälfte Südmagnetismus, einen Südpol, in der Südhälfte Nordmagnetismus, einen Nordpol hat. Die magnetischen Erdpole fallen nicht mit den geographischen zusammen und liegen sowohl nach Berechnungen und Constructionen, als nach den Beobachtungen von John Roß (1831) und James Roß (1841) nördlich von der Mitte der Nordküste von Nordamerika, etwa 20° vom geographischen Nordpole, und südlich zwischen den Vulkanen Erebus und Terror im Südpolarlande 24° vom geogr. Südpole entfernt. Die Sprachverwirrung fällt bei der französischen Bezeichnung weg, weil die Franzosen den nach Norden gerichteten Nadelpol Südpol nennen.

451 **Die magnetische Influenz oder Vertheilung** (Aepinus 1759?). Die magnetische Influenz ist die Erscheinung, daß ein Stück Eisen in der Nähe eines Magnetes selbst ein Magnet wird. Sie erklärt sich durch die zwei Gesetze der Influenz:

1. In jedem Eisenkörper sind beide Magnetismen an jeder Stelle in gleicher Menge vorhanden und neutralisiren einander.

2. Nähert man einen neutralen Eisenkörper einem Pole, so zieht dieser den ungleichnamigen Magnetismus in den zugewandten Theil und stößt den gleichnamigen Magnetismus in den abgewandten Theil des Eisenkörpers.

Induction des ersten Gesetzes. Nähert man einem Magnet ein Stück Eisen, so wird dasselbe selbst ein Magnet, jedoch ohne seinen Magnetismus durch Mittheilung zu erhalten. Wenn es seinen Magnetismus nicht durch Mittheilung erhalten hat, so muß derselbe schon vorher in dem Eisen gewesen sein. Da er jedoch vorher nicht merkbar war, so mußte er aufgehoben sein. Aufgehoben wird aber Magnetismus nur durch die gleiche Menge des entgegengesetzten Magnetismus; folglich müssen an jeder Stelle eines Eisenkörpers beide Magnetismen in gleicher Menge vorhanden sein und sich so neutralisiren.

In dieser Schlußkette sind drei Behauptungen oder Prämissen enthalten, welche durch Versuche dargethan werden müssen. Die erste Prämisse ist, daß ein Stück Eisen in der Nähe eines Magnetes selbst ein Magnet wird. Dies zeigen folgende Versuche: Hängt man an den einen Pol eines Magnetes ein Stück Eisen, so kann man an dieses ein zweites kleineres, an dieses ein drittes, eine Stahlfeder oder ein Drahtstück, an dieses ein viertes, Eisenfeilspäne u. drgl. hängen. Befestigt man in der Nähe eines Poles ein Eisenstück, so zieht dieses Eisenfeilspäne oder ein anderes Eisenstück an und hält es fest.

Die zweite Prämisse behauptet, daß das Magnetisiren des Eisens nicht durch Mittheilung geschehen sei. Dafür sprechen folgende 4 Gründe: 1. Wäre es Mittheilung, so müßte der Magnet bei jedem Versuche von seiner Kraft verlieren; da er jedoch bei beliebig wiederholten Versuchen seine Stärke unverändert beibehält, so ist es keine Mittheilung. 2. Wäre es Mittheilung, so dürfte das Magnetisiren nur bei der Berührung stattfinden; da es jedoch auch schon bei bloser Annäherung geschieht, so ist es keine Mittheilung. 3. Wäre es Mittheilung, so müßte das Eisen nach seiner Entfernung ebenfalls noch ein Magnet sein; da es jedoch nach seiner Entfernung kein Magnet mehr ist, so ist das Magnetisiren keine Mittheilung gewesen. 4. Wäre es Mittheilung, so müßte ein Stück Eisen, das am Nordpole hängt, nur Nordmagnetismus enthalten; da es jedoch gerade am zugewandten Ende Südmagnetismus enthält, und am abgewandten Ende Nordmagnetismus, so ist es keine Mittheilung. Aehnliches gilt, wie durch Versuche mit der Magnetnadel in diesem und in jenem Falle nachzuweisen ist, für ein Stück Eisen, das am Südpole hängt.

Die dritte Prämisse behauptet, daß Magnetismus nur aufgehoben werde durch eine gleiche Menge des entgegengesetzten Magnetismus; dies wird durch folgende Versuche bewiesen: Legt man zwei Magnete mit gleichnamigen Polen auf einander, so wird die magnetische Anziehung an jeder Stelle stärker; legt man jedoch zwei gleich starke und gleich

lange Magnetstäbe mit entgegengesetzten Polen auf einander, so üben sie keine Anziehung mehr aus. Hängt man an einen Pol ein Stück Eisen und legt auf denselben den entgegengesetzten Pol eines gleich starken Magnetes, so fällt das Stück Eisen sofort ab; dies findet sogar schon bei starker Annäherung des zweiten Poles statt. Legt man aber den ungleichnamigen Pol eines schwächeren Magnetes auf, so findet zwar eine Schwächung, aber keine gänzliche, sondern nur eine theilweise Aufhebung der Anziehung statt.

Induction des zweiten Gesetzes. Das zweite Gesetz ist eine Verbindung des ersten mit den 2 Grundgesetzen. In einem Stück Eisen sind beide Magnetismen an jeder Stelle vorhanden; nähert man dasselbe einem Pole, so zieht dieser nach den 2 Grundgesetzen den entgegengesetzten Magnetismus des Eisens so nahe wie möglich zu sich herbei, zieht ihn also in die zugewandte Hälfte des Eisens; den gleichnamigen Magnetismus aber stößt er so weit wie möglich fort, treibt ihn also in die abgewandte Hälfte des Eisens. Hierdurch erhält die eine Hälfte des Eisens Nordmagnetismus, einen Nordpol, die andere Südmagnetismus, einen Südpol; das Eisen ist ein Magnet geworden. Es erklärt sich hieraus nicht blos die Erscheinung der Influenz, daß ein Stück Eisen in der Nähe eines Magnetpoles selbst ein Magnet wird, sondern es ist auch der 4te Grund gegen die Mittheilung, daß nämlich ein genäherter Eisenstab am zugewandten Theile ungleichnamigen, am abgewandten Theile gleichnamigen Magnetismus enthält, aufgeklärt; ebenso erklärt sich der 3te Grund und die Thatsache, daß der influenzirte Eisenkörper nur während der Anwesenheit des Poles ein Magnet ist und nach seiner oder des Poles Wegnahme seinen Magnetismus wieder verliert: die 2 durch die Wirkung des Poles von einander getrennten Magnetismen des Eisens ziehen sich nach Entfernung des Poles wieder an, vermischen sich und heben einander auf. Endlich erklärt sich nun leicht, warum die Influenz auch Vertheilung genannt wird. Man stellt sich nämlich die beiden Magnetismen hierbei als feine Flüssigkeiten oder Fluida vor, welche in einem gewöhnlichen Körper an allen Stellen gleichmäßig gemischt sind; durch die Einwirkung eines Poles denkt man sich nun die gemischten Flüssigkeiten von einander getrennt und in die beiden Hälften des Körpers vertheilt; ebenso denkt man sich auch in einem Magnet die beiden Fluida von einander geschieden und auf die beiden Hälften vertheilt.

Mittels der Anschauungen der Influenz kann man alle bisher betrachteten magnetischen Erscheinungen erklären, zunächst die magnetische Anziehung überhaupt. In der Nähe eines Magnetpoles erhält der genäherte Theil eines Eisenstückes, den entgegengesetzten, der entferntere Theil den gleichnamigen Pol; folglich wird der genäherte Theil angezogen und zwar wegen seiner Nähe viel stärker, als der entferntere Theil abgestoßen wird; folglich muß sich der ganze Körper dem Magnetpole nähern; es gibt keine andere magnetische Anziehung als die zwischen ungleichen Polen. Jeder angezogene Körper ist während der Anziehung selbst ein temporärer Magnet. — Dann erklärt sich aus der Influenz das struppige Aussehen eines in Eisenfeile getauchten Magnetstabes; jedes kleine Eisentheilchen hat an dem berührenden Ende denselben ungleichnamigen und am abgewendeten Ende denselben gleichnamigen Pol; folglich stoßen sich alle abgewendeten Enden einander ab, entfernen sich also so weit als möglich von einander. — Weiter erklären sich aus der Influenz die von einem Pole zum anderen in elliptischen Krümmungen sich hinziehenden Magnetcurven, die entstehen, wenn man auf einen Magnetstab eine Glas- oder Papiertafel legt, auf dieselbe Eisenfeile streut und sie dann leicht anstößt. — Ferner erklärt sich hieraus die Verschiedenheit in der Wirkung eines Magnetstabes, daß die magnetische Anziehung von den beiden Polen nach der Mitte zu abnimmt und in der Indifferenzzone = Null ist; denn die beiden ungleichen Magnetismen der beiden Hälften ziehen einander an und vermischen sich; in der Indifferenzzone sind beide in gleicher Stärke vorhanden und heben sich daher auf; von dieser nach dem Nordpole hin nimmt der Nordmagnetismus zu und der Südmagnetismus ab, so daß ein immer kleinerer Theil des ersteren durch die geringeren Beträge des letzteren aufgehoben wird; umgekehrt verhält es sich in der Südhälfte. Man kann hiernach sagen, daß die Nordhälfte mehr Nord- als Südmagnetismus, die Südhälfte mehr Süd- als Nordmagnetismus enthält. — Endlich erklärt es sich hieraus, warum Eisenstäbe, besonders wenn sie aufrecht stehen, wie Fensterstangen, allmälig Magnete werden, und zwar unten einen Nord-, oben einen Südpol haben; der Südmagnetismus unserer nördlichen Erdhälfte zieht nämlich den Nordmagnetismus der Stäbe in ihr unteres Ende; umgekehrt verhält es sich auf der südlichen Erdhälfte.

Im Schmiedeeisen erfolgen die angegebenen Wirkungen rasch und stark, aber vorübergehend, im Stahl langsam und schwach aber dauernd. Man schrieb dies früher einer eigenen Kraft zu, welche dem Fließen der beiden Magnetismen eines Körpers einen Widerstand entgegensetze, und welche man Coërcitivkraft nannte. Man stellte sich vor, daß sie im Schmiedeeisen gering, im Stahl groß sei, daß deßhalb im Schmiedeeisen die Magnetisirung rasch und leicht durch Trennung der beiden Magnetismen geschehe, daß dieselben

aber durch rasche Vereinigung sich auch gleich wieder aufhöben, daß dagegen im Stahl die Vereinigung der Magnetismen wegen der großen Coërcitivkraft nur schwer aufgelöst werde, und wenn sie einmal aufgelöst sei, nur schwer wieder hergestellt werden könne, wodurch es sich erkläre, daß Schmiedeeisen nur ein temporärer, Stahl aber ein dauernder oder permanenter Magnet werden könne. Weiter nahm man an, daß die Ueberwindung der Coërcitivkraft durch manche Wirkungen beschleunigt werde. So wird z. B. ein Eisenstab in der Nähe eines Poles stärker magnetisch, wenn man ihn reibt; die auf der Erde stehenden Eisenstäbe werden rascher zu Magneten, wenn sie Stößen und Schlägen von oben nach unten ausgesetzt sind. Da alle übrigen Körper mit wenigen Ausnahmen para- oder diamagnetisch sind, von einem hinreichend starken Magnetpole entweder angezogen oder abgestoßen werden, so mußte man auch in ihnen das Vorhandensein beider gemischten Fluida voraussetzen; man dachte sich nur, daß sie eine ungewöhnlich große Coërcitivkraft besäßen, dem Fließen der Magnetismen sehr große Widerstände entgegensetzten, und daß daher nur durch sehr starke Magnete die Fluida vertheilt und dadurch die Anziehung oder Abstoßung ermöglicht würden. Um diesen Unterschieden auf den Grund zu kommen, wurde deßwegen von Jamin (1873), L. Külp (1874) u. A. die Influenz auf Schmiedeeisen und verschiedene Stahlsorten genauer untersucht.

Jamin brachte einen schmiedeeisernen Stab immer näher an einen sehr starken Pol und beobachtete, daß dessen Indifferenzzone näher an dem Pole lag als die Mitte der Stablänge, und daß sie um so mehr von der Mitte nach dem zugewandten Ende hinrückte, je näher der Stab dem Pole kam, und daß endlich bei der Berührung aller entgegengesetzte Magnetismus in die Berührungsfläche gerückt war; der ganze Stab zeigte dann in fast gleicher Stärke und auf Meterlänge nur den gleichnamigen Magnetismus. Jamin sagt deßhalb, die geringe Coërcitivkraft des Schmiedeeisens bestände darin, daß es ein guter Leiter magnetischer Spannungen sei. Zugleich erschienen an der Berührungsstelle des Poles und des Stabes, die sich stark anzogen, die beiden Magnetismen des Poles und des Stabendes aufgehoben, waren also von gleicher Stärke. Wurden dagegen Stahlstäbe benutzt, so war der Magnetismus des Poles nicht ganz aufgehoben, es war also weniger von dem entgegengesetzten Magnetismus angezogen; ebenso war der gleichnamige Magnetismus auf dem Stabe schwächer und erstreckte sich nicht so weit; und zwar war diese Verminderung allerseits um so stärker, je härter und reicher der Stahl war. Nach der Wegnahme vom Pole wurden die Eisenstäbe wieder neutral, die Stahlstäbe blieben aber Magnete, hatten einen entgegengesetzten Pol an der ehemaligen Berührungsfläche, dann kam eine neutrale Zone, und dann eine gleichnamige Magnetisirung auf eine gewisse Strecke, während das übrige Ende neutral blieb. Jamin erhielt hierdurch also ganz abnorme permanente Magnete. Seine Ansicht, Schmiedeeisen sei ein guter und Stahl ein schlechter Leiter des Magnetismus, widerspricht aber so sehr allen hergebrachten Anschauungen, daß wir eine weitere Klärung abwarten müssen.

Die Vorstellung, der Magnetismus bestände aus zwei Fluiden, die im Nichtmagnet vereinigt, im Magnet dagegen von einander geschieden seien, ist wohl zulässig, weil sie die Erscheinungen unter einen Gesichtspunkt bringt, hat aber hierdurch nicht die Berechtigung, für Wahrheit zu gelten. Wegen ihrer Einfachheit wird sie indeß immer noch angewendet, obwohl ihr eine Erscheinung widerspricht, die für einen ganzen Magnet die Wahrheit jener Vorstellung absolut aufhebt und ihr höchstens für die kleinsten Theilchen, die Moleküle, Gültigkeit beläßt; diese Erscheinung hat außerdem eine andere Vorstellung, die wir mit jener Erscheinung nun betrachten wollen, sehr nahe gelegt.

452 **Die Constitution der Magnete** (Coulomb 1779). Zerbricht man eine magnetisirte Stricknadel in zwei Stücke, so ist jedes Stück ein Magnet mit einem Nord- und einem Südpole; das eine Stück hat an der Bruchstelle, wo vorher die Indifferenzzone war, einen Nordpol, das andere einen Südpol, die beiden früheren Endpole bleiben ungeändert. Denselben Versuch kann man beliebig oft wiederholen; man erhält immer kleinere und immer schwächere Magnete, aber doch immer vollständige Magnete mit zwei Polen. Daraus folgt, daß auch die kleinsten Theile eines Magnetes, die Moleküle selbst, Magnete sind, daß die eine Hälfte jedes Moleküls Nord-, die andere Südmagnetismus besitzt, und da bei dem Zerbrechen immer die nach dem ersten Nordpole hin gerichteten Bruchstellen Nordpole sind und die entgegengesetzten Südpole, so folgt weiter, daß die Nordenden der Moleküle eines Magnetes nach der einen Seite, nach dem Nordpole zu, die Südenden nach der anderen Seite, nach dem Südpole zu liegen.

Aus dieser Constitution des M. erklären sich leicht sämmtliche magnetische Erscheinungen:

1. Die Anziehung. Wird ein Stück Eisen dem einen Ende z. B. dem Ende genähert, nach welchem sämmtliche Nordenden der Moleküle gerichtet sind, so ist es allen diesen Nordenden näher als den Südenden; folglich wird sein Südmagnetismus in sein genähertes Ende gezogen, und dieser Südmagnetismus wird nun von allen Nordenden stärker angezogen als von den zugehörigen Südenden abgestoßen, weil er den ersteren näher ist als den letzteren; es bleibt daher Anziehung übrig. 2. Die Indifferenzzone. An der Mitte eines M. ist ein Stück Eisen immer gleich weit von dem Nordende eines Moleküls und dem Südende eines anderen entfernt, weßhalb die Einwirkungen sich aufheben. 3. Die Abnahme der Anziehung von den Enden nach der Mitte zu. Ein Eisenstück, das in irgend eine Gegend zwischen das Ende und die Mitte eines M. gebracht wird, hat zu seinen beiden Seiten Theilchen von entgegengesetzter und daher neutralisirter Wirkung; nur die entfernteren Moleküle, die nicht zu den beiderseits gleich gegen das Eisenstück gelagerten gehören, können noch anziehend wirken; daher ist die Anziehung geringer. 4. Die Lage der Pole etwas abwärts von den Enden. Ein Eisenstück wird nicht blos von dem Ende, in dessen Nähe es sich befindet, sondern von allen Molekülen des ganzen Magnetes angezogen, aber von diesen mit stark abnehmender Kraft; würde es von dem Ende allein angezogen, so würde es sich nach dem Ende hinbewegen, dieses Ende würde der Pol sein; da es aber auch nach den übrigen Theilen, aber mit geringerer Stärke hingezogen wird, so muß es die Richtung der Resultante einschlagen, die nach einem etwas vom Ende abliegenden Punkte hingeht; dorthin bewegen sich also die meisten Eisentheile, dort ist der Pol. 5. Das Magnetisiren besteht darin, daß die kleinen Molekularmagnete gedreht werden, so lange bis ihre Nordpole nach der einen, ihre Südpole nach der entgegengesetzten Seite gerichtet sind. 6. Coërcitivkraft ist der Widerstand, den die Molekularmagnete ihrer Drehung entgegenstellen; kehren die Moleküle von selbst wieder in die frühere Lage zurück, so ist der Körper temporär magnetisch; verharren sie in der parallelen Lage, so ist der Körper permanent magnetisch. 7. Der Unterschied zwischen para- und diamagnetischen Körpern beruht darin, daß die ersteren die Pole ihrer Molekularm. nach dem ungleichnamigen, die letzteren nach dem gleichnamigen Pole hin richten.

Von der Richtigkeit der angegebenen magnetischen Constitution überzeugt ein Versuch: Man füllt eine Glasröhre mit Eisenfeile, verschließt sie mit Korken und magnetisirt sie nach den sogleich anzugebenden Methoden. Schüttelt man sie, so verliert sie ihren Magnetismus, weil nun die einzelnen magnetisch gewordenen Theilchen ihre Pole nicht mehr in der gleichen, sondern in verschiedenen Lagen haben.

Nach van Rees (1847) ist die magnetische Polarität, die magnetische Kraft der einzelnen Schichten, d. i. die Menge der in die richtige Lage gedrehten Molekularm. in der Indifferenzzone am größten und an den Enden am kleinsten. Nennen wir die Magnetismen der einzelnen Schichten von dem Nordende an der Reihe nach n und s, n_1 und s_1, n_2 und s_2 ...., so würde s von n_1 aufgehoben, ebenso s_1 von n_2 u. s. w., wenn alle Schichten dieselbe Polarität hätten; da nun aber auf der Nordseite ein Ueberschuß von Nordmagnetismus übrig bleibt, so muß n_1 größer als s, n_2 größer als s_1 u. s. w. sein. Dieser Folgerung entspricht der Versuch: zerbricht man eine magnetisirte Nadel, so haften an den mittleren Stücken mehr Eisenspäne als an den Endstücken. Dies scheint ein Widerspruch gegen die Indifferenzzone und das Wachsen der magnetischen Anziehung nach den Polen hin zu sein, ein Widerspruch, der sich in folgendem Satze löst: Die innere magnetische Kraft wächst von den Polen bis zur Indifferenzzone und ist in dieser am größten; die Wirkung nach außen jedoch wächst von der Indifferenzzone bis zu den Polen und ist bei diesen am größten.

Es wird sich später zeigen, daß man von einer eigenen magnetischen Kraft der Moleküle, von einer Scheidung derselben in zwei Arten und einer Vertheilung der zwei Arten auf die beiden Hälften der Moleküle ganz absehen kann; nach Ampères Theorie besteht der Magnetismus darin, daß die Moleküle von elektrischen Strömen umkreist sind, und die Magnetisirung hat nur die Aufgabe, diese elektrischen Ströme einander parallel und gleich gerichtet zu machen.

Die Erzeugung des Magnetismus. Bei der Erzeugung des Magnetismus muß die Entstehung des temporären oder vorübergehenden Magnetismus von der des permanenten, remanenten oder dauernden Magnetismus unterschieden werden. Im Schmiedeeisen entsteht fast nur temporärer Magnetismus; im Stahl dagegen entsteht temporärer und permanenter Magnetismus. Die Magnetisirung von Eisen und Stahl kann geschehen sowohl durch Annäherung oder Berührung, als insbesondere durch Streichen mit oder an permanenten oder temporären Mag- 453

neten; sie kann jedoch auch geschehen durch vielfaches Herumführen eines elektrischen Stromes um Eisen- oder Stahlstäbe. Von besonderer Wichtigkeit ist die Erzeugung der Hufeisenmagnete, da die beiden Pole derselben gewöhnlich an den neben einander liegenden Enden der zwei Schenkel sich befinden und daher leicht zur Zusammenwirkung gebracht werden können. Wir betrachten zuerst das Bestreichen von Stahlstäben mit permanenten Magneten, die älteste Methode, welche die Bezeichnung Strich führt.

Beim einfachen Strich (Gilbert 1633 de magnete) setzt man den einen Pol eines M. auf die Mitte des zu magnetisirenden Stabes, streicht nach dem einen Ende hin, hebt dort hoch auf, geht in der Höhe wieder bis zur Mitte, setzt dort abermals auf und streicht wieder bis zum Ende; dasselbe wiederholt man oftmals, und verfährt dann mit der anderen Hälfte des Stabes in gleicher Weise, aber mit dem anderen Magnetpole. Nach der Vorstellung der Influenz zieht man hierbei mit dem Streichpol das entgegengesetzte Fluidum in den bestrichenen Theil und stößt das gleichnamige in den anderen Theil. Nach der Vorstellung der Molekularmagnete besteht die Wirkung darin, daß man die dem aufgesetzten Pole ungleichnamigen Pole der Molekularm. auf diejenige Seite dreht, nach welcher hin der Strich geschieht, und daß die gleichnamigen Pole nach der entgegengesetzten Seite gedreht werden; so erhält das Ende, an welchem der Strich aufhört, immer den entgegengesetzten Pol des streichenden Poles. Statt die beiden Pole eines Stabes nacheinander anzuwenden, kann man auch die entgegengesetzten Pole zweier Stäbe zugleich benutzen; man setzt sie öfter in der Mitte auf und fährt nach beiden Seiten hin, die dann zu den streichenden Polen ungleichnamige Pole erhalten; diese Methode nennt man den getrennten Strich (Duhamel).

Beim Doppelstrich (Michell und Aepinus 1760?) setzt man die entgegengesetzten Pole zweier Magnete (unter Benutzung eines Holzdreiecks) unter Winkeln von 20° auf die Mitte des zu magnetisirenden Stabes, und streicht in derselben Lage gleichzeitig mit beiden Stäben vorwärts bis zum einen Ende, dann zurück über den ganzen Stab bis zum anderen Ende, dann wieder vorwärts über den ganzen Stab bis zum ersten Ende, wiederholt dies öfter, und hebt endlich in der Mitte ab. Statt die entgegengesetzten Pole zweier M. zu benutzen, kann man auch einen hufeisenförmig gebogenen Magnetstab in derselben Weise anwenden, da diese Form den Vortheil hat, daß die beiden Pole nahe beisammen sind. Hierbei wird auf die Moleküle des Stabes, die zwischen den beiden Streichpolen liegen, immer so eingewirkt, daß sie ihre Nordpole nach dem streichenden Südpole und ihre Südpole nach dem streichenden Nordpole richten, worin die beiden Streichpole durch Anziehung und Abstoßung sich unterstützen; auch hier erhält wieder das Ende, das immer vom Nordpole berührt wird, einen Südpol und umgekehrt. Beide Methoden, der einfache wie der Doppelstrich werden genau in derselben Weise bei der Erregung von Hufeisenmagneten angewendet; am bequemsten ist hierbei ein Hufeisenmagnet von gleicher Schenkelbreite, den man senkrecht auf das horizontal hingelegte Hufeisen setzt und entweder vom Scheitel nach den Enden oder umgekehrt fährt (Hoffer).

Die Wirkungen sind nach dem van Rees'schen Satze kräftiger, wenn man den Stab zu dem mittleren Theile anderer Stäbe oder Magnete macht oder ihn auf die entgegengesetzten Pole zweier Magnete legt; auch wird die Wirkung dadurch verstärkt, daß man alle Seiten eines Stabes bestreicht.

Der Kreisstrich besteht darin, daß man 4 Stahlstäbe, von denen 2 schon M. sein können, zu einem Rechtecke legt, oder daß man zwei Hufeisen mit ihren Enden an einander bringt, oder daß man vor die Enden eines Hufeisens einen Anker, d. i. eine Platte von weichem Eisen legt und dann mit einem Pole eines Stabes an irgend einer Stelle senkrecht aufsetzt, öfter die geschlossenen Räume ganz durchstreicht nnd an der Anfangsstelle wieder aufhebt. Es ist offenbar, daß der Pol sämmtliche gleichnamige Molekülpole von sich ab und sämmtliche ungleichnamige nach sich hin wendet, daß also das bestrichene Hufeisen da, wo der Pol heranstritt, einen ungleichnamigen, und da, wo er wieder in das Hufeisen eintritt, einen gleichnamigen Pol erhält. Nach Dove liefert der Kreisstrich die besten Resultate, weil hierbei die vorgelegten Anker oder Hufeisen ebenfalls M. mit ententgegengesetzten Polen werden und dadurch vertheilend wirken.

Daß durch blose Annäherung und durch Berührung eines starken Magnetes ebenfalls Magnetismus entsteht, und zwar sowohl temporärer wie permanenter, ist schon in 451. gezeigt worden. Die stärksten temporären Magnete entstehen, wenn um ein großes, weiches Hufeisen Kupferdrähte gewunden sind und durch diese ein elektrischer Strom geht. Diese nur für die Zeit des Stromlaufes dauernden Magnete heißen Elektromagnete (525.); sie dienen zur Erzeugung permanenter Magnete, indem man Stahlstäbe an denselben streicht. Jedoch können auch permanente Magnete durch elektrische Ströme entstehen, wenn dieselben nämlich um Stahlstäbe kreisen; man windet z. B. einen Kupferdraht vielfach um

eine Spule, läßt durch den Draht einen Strom gehen, und führt den Stab öfter durch die Spule oder bewegt die Spule öfter über den in ihr steckenden Stab hin und her; auch das ruhige Verweilen eines Stabes in einer Stromspule erzeugt permanenten Magnetismus.

Die Stärke des temporären wie des permanenten Magnetismus eines Stabes ist von sehr verschiedenen Umständen abhängig, von der Größe der magnetisirenden Kraft, von der Anzahl der Einwirkungen der Striche oder Spulbewegungen, von den Dimensionen und der Gestalt des Stabes; von der Dichte, dem Kohlenstoffgehalt, der Härte, ja sogar von der Härtungsweise des Eisens u. s. w. Die Art dieser Abhängigkeit ist noch dunkel, obwohl hierüber gerade in der letzten Zeit zahlreiche Forschungen stattfanden. Ein wichtiger Begriff hierbei ist die magnetische Sättigung. Im Allgemeinen steigt der Magnetismus eines Stabes mit der Zahl der Einwirkungen; jedoch erreicht derselbe bald eine gewisse Grenze, über welche hinaus weiteres Streichen nicht mehr wirkt. Der nun erreichte Magnetismus verharrt jedoch nicht; der temporäre Theil schwindet, der remanente bleibt; man nennt nun den Stab magnetisch gesättigt. Jedoch gilt diese Sättigung nur für die angewendete Kraft. Gegen kleinere Kräfte als diese verhält sich der Stab indifferent; eine größere Kraft vermag jedoch noch Magnetismus zu erzeugen bis zu einem höheren Grade der Sättigung; bei einer gewissen Steigerung der Kraft wird indessen ein nicht überschreitbares Maximum der Sättigung erreicht. Ist bei Anwendung einer gewissen Kraft die Sättigung noch nicht erreicht, so vermag auch eine geringere Kraft noch Magnetismus zu erzeugen (Frankenheim 1864).

Der temporäre Magnetismus des Schmiedeeisens wächst, wie schon Coulomb u. a. ältere Physiker fanden, bei kleinen magnetisirenden Kräften stärker als diese, bei großen aber schwächer als diese; und dieses Gesetz gilt in höherem Maße bei gestreckteren und weniger dichten, als bei gedrungeneren und dichteren Stäben; die ersteren erreichen mit kleineren Kräften mehr Magnetismus und sind eher gesättigt als die letzteren (Börnstein 1875). Der temporäre Magnetismus von Stahlstäben aber wächst bei kleinen magnetisirenden Kräften langsamer als diese, und erreicht einen Grenzwerth, der um so kleiner und um so früher erreicht wird, je härter der Stahl ist; bei größeren Kräften aber wächst der temp. Magnetismus anfangs schneller als die Kräfte und nähert sich erst später einem Maximalwerth. Auch der remanente Magnetismus wächst anfänglich schneller als die magnetisirenden Kräfte und erreicht um so früher ein Maximum, je weicher der Stahl ist. Der durch jede Wiederholung erzeugte Magnetismus steht jedoch zu dem Maximum in einem constanten Verhältnisse, das unabhängig von der Härte, den Dimensionen und der Kraft ist. Ueber das gegenseitige Verhältniß von temporärem und remanentem Magnetismus, das mit den Umständen veränderlich ist, kennt man nur den Satz: der ganze Magnetismus bleibt fortwährend unverändert; was an remanentem Magnetismus gewonnen wird, geht an temporärem verloren (Fromme 1875). Nach Küllp (1874) hat die Textur des Eisens keinen Einfluß auf die magnetische Stärke. Um so einflußreicher aber sind Härte und Kohlengehalt. Nach Trève (1875) wächst der Magnetismus bei gleicher Härte mit dem Kohlengehalte, und bei gleichem Kohlengehalte mit der Härte; jedoch ist bei hohem Kohlengehalte der Einfluß der Härte gering, bei niederem Kohlengehalte dagegen deutlich. Holz (1874) legte Magnetstäbe in Salzsäure und ätzte sie hierdurch allmälig ab; Stäbe von Corsettstahl zeigten dabei hervortretende Rippen von unlöslichem Kohleneisen und ergaben einen höheren Magnetismus für die Gewichtseinheit; hieraus schloß man, daß das Kohleneisen der Träger des permanenten Magnetismus sei. Um die hierdurch entstehende Frage zu lösen, ob das reine Eisen wie das Schmiedeeisen nur temporären Magnetismus annehme, stellte sich Holz (1875) durch Elektrolyse reines Eisen dar; es ergab sich indeß, daß auch reines Eisen permanenten Magnetismus annehme. Jedoch wurde durch Glühen, wobei das sp. G. größer wurde, der perm. Magn. bedeutend verringert, während der Stahl, der durch Glühen ein kleineres sp. G. erhält, seinen permanenten Magnetismus dabei erhöht; Holz schloß hieraus, daß die Coërcitivkraft eine Function der molekularen Zwischenräume und von der Größe derselben abhängig ist.

In einer ausgedehnten Reihe schöner magnetischer Forschungen kam Jamin (1873) auch auf den Einfluß der Härte und des Kohlengehaltes. Der temporäre Magnetismus, sagt Jamin, der bei dem weichen Eisen allein vorhanden ist, nimmt ab von diesem bis zu den härtesten und reichsten Stahlen, wo er fast = Null ist; bei den letzteren ist indeß auch der Gesammtmagnetismus und daher auch der remanente Magnetismus gering. Kohlenstoffreiche Stahle nehmen daher, wie sie durch jähes Abschrecken sehr hart geworden sind, sehr wenig perm. M. an; wenn sie dagegen durch Anlassen weniger hart sind, können sie einen gewissen Grad von perm. Magn. aufnehmen, der wieder geringer wird, wenn das Anlassen zu weit geht. Arme und mittlere Stahle dagegen nehmen am meisten perm. M. an, wenn sie durch jähes Abschrecken sehr hart geworden sind, nehmen dagegen weniger auf, wenn sie durch Anlassen weicher werden, und um so weniger, je weiter das Anlassen

geht. Durch dieses verschiedene Verhalten der Stahle erklärt es sich, warum es keine bestimmten Regeln für das Herstellen bester Magnete gibt; jeder andere Stahl muß je nach seinem Kohlenstoffgehalte in anderer Weise abgeschreckt und wieder angelassen werden, um sein Maximum zu erreichen. Bouty (1875) schließt aus seinen Versuchen, entsprechend den Angaben von Holz, daß das Kohleneisen in einem Stahl der Träger des permanenten, das zwischenlagernde weiche Eisen aber der Träger des temporären Magnetismus ist; trotzdem, so ergeben seine Berechnungen, entsprechend den Angaben Jamins, nehme nicht der reichste Stahl den meisten perm. M. an, sondern der mittlere Stahl.

Auch den Einfluß der Dimensionen des Stabes auf den perm. M. unterzog Jamin neuen Forschungen. Er bestimmte die magnetische Stärke irgend einer Stelle, indem er an dieselbe ein kleines Stück weiches Eisen, einen Contact oder Anker anlegte, welcher an dem einen Ende eines Wagbalkens hing, während an dem anderen eine hohe Spiralfeder befestigt war; diese stand durch einen gespannten Faden mit einer kleinen Walze in Verbindung, welche mittels einer kleinen Kurbel gedreht wurde und so die Feder auseinander zog und den Anker am anderen Ende abriß; an der Verlängerung der Feder ließ sich die Kraft des Abreißens ablesen. Diese ist nicht gleich der magnetischen Kraft, sondern nach Coulomb gleich dem Quadrat derselben; denn ein Contact aus weichem Eisen erfährt von der magnetischen Stelle eine Influenz, indem der Magnetismus jener Stelle ebenso viel entgegengesetzten Magnetismus in die Contactfläche zieht; ist nun z. B. eine magnetische Stelle 3mal so stark geworden, so zieht sie auch in die Contactfläche den 3fachen entgegengesetzten Magnetismus, und bewirkt dadurch ein 9mal so starkes Festhalten. Als nun Jamin sehr dünne Stahlplatten von gleicher Länge aber verschiedener Breite und Dicke bis zur Sättigung magnetisirte, nahm der Magnetismus mit der Dicke zu und schwankte nicht merklich mit der Breite. Nach der Länge war in der Mitte und bis auf eine kleine Entfernung von den Enden die Abreißungskraft = Null; trug man diese Kräfte von dieser Stelle bis zu den Enden als Ordinaten auf, so entstanden 2 kleine nach den Polen convexe Kraftcurven. Legte man nun mehrere gleiche Lamellen auf einander, so stiegen die Curven und verlängerten sich nach der Mitte zu, die sie erst bei einer gewissen Anzahl von Lamellen erreichten; durch Aufeinanderlegen mehrerer Platten wird also die magnetische Kraft verstärkt und ausgedehnt; in dem Augenblicke, wo die 2 Curven in der Mitte zusammenlaufen, ist das Maximum der Combination erreicht; weiter aufgelegte Platten bewirken keine weitere Verstärkung. Es lassen sich auch Stahlstäbe im Ganzen so magnetisiren, daß sie dieselbe Curve erzeugen; Jamin nennt solche Plattenverbindungen und Stäbe normale Magnete. Für solche ergab sich nun das interessante Gesetz, daß die Abreißungskraft an den Polen der Länge direct proportional ist, daß also die Anziehung in geradem Verhältnisse zur Quadratwurzel aus der Länge steht, und, da ihre Curve eine gerade Linie ist, von der Mitte an gleichmäßig nach den Polen hin zunimmt. Auch mit der Dicke nahm die Kraft eines Stabes und der Plattenverbindung zu, jedoch weniger als die Dicke, so daß sie ein Maximum erreicht; bei der Verbindung bestätigte sich der längst bekannte Satz, daß n gleiche Platten nicht den n fachen, sondern einen wesentlich kleineren Magnetismus erzeugen, daß die Wirkung der Summe kleiner ist als die Summe der Wirkungen. Auf einander liegende Magnete schwächen sich also gegenseitig, offenbar weil z. B. jeder Nordpol in den benachbarten Nordpol Südmagnetismus zieht und dadurch einen Theil von dessen Nordm. aufhebt; nimmt man aus einer Verbindung eine Platte heraus und untersucht ihren Magnetismus, so findet man denselben wesentlich geschwächt.

Später (1876) veröffentlichte Jamin neue Versuche über die Dicke. Entsprechend den Versuchen von Holz ergab sich auch hier, daß der Magnetismus unter Umständen tiefer eindringe, als man bisher vorausgesetzt hatte; in weiche oder angelassene Stahlsorten dringt der Magnetismus tief ein; die Tiefe nimmt ab mit der Härtung und dem Kohlenstoffgehalte, und in die reichsten und härtesten Stahle dringt er weniger als 0,1^{mm} tief ein, selbst wenn er von den stärksten Kräften erregt ist, so daß das Eindringen in verschiedenen Stäben im umgekehrten Verhältnisse zur Stärke des Stabmagnetismus steht. Sind mehrere verschieden dicke Platten so dünn, daß der Magnetismus dieselben ganz durchdringen kann, so werden die dickeren Platten durch dieselbe magnetisirende Kraft im Verhältniß der Dicke stärker als die dünneren, weil der Magn. in ersteren eine dickere Schicht durchdringt; sind aber die verschieden dicken Platten sehr dick, so werden sie durch gleiche Kräfte gleich stark, weil jetzt die magnetischen Schichten gleiche Dicke besitzen. Bei gleichen Stäben wächst jedoch die Dicke der magnetischen Schicht mit der magnetisirenden Kraft. Jamin wies dies nach, indem er die Platten in Schwefelsäure abätzte, und in den Stäben, die einer größeren Kraft ausgesetzt waren, nach dem Abätzen noch Magnetismus fand, während die von schwachen Kräften erzeugten Stäbe bei gleichem Abätzen keinen Magnetismus mehr zeigten. Auf dieselbe Weise zeigte Jamin, daß der eingedrungene Magnetismus inwendig eben so stark ist als an der Oberfläche.

Jamin benutzte die Sätze über das Eindringen zur Erklärung einer schon früher (1872) aufgefundenen Erscheinung. Wiedemann hatte nämlich beobachtet, daß ein magnetisirter Stab durch eine kleinere Kraft entmagnetisirt werden könne, vorausgesetzt, daß diese überall entgegengesetzten Magnetismus erzeuge. Wenn nun ein solcher Stab wirklich neutral geworden wäre, so mußte er sowohl den ursprünglichen, als auch den entgegengesetzten Magnetismus wieder anzunehmen im Stande sein, und zwar durch jede beliebig kleine Kraft. Jamin fand jedoch, daß ein solcher Stab zwar den ursprünglichen durch eine kleinere Kraft wieder annehme, nicht aber den entgegengesetzten. Dieses sonderbare Verhalten erklärte Jamin durch seine Gesetze des Eindringens: Der von der stärkeren Kraft erweckte ursprüngliche Magnetismus bringe tief in den Magnet ein, der von der schwächeren Kraft erzeugte entgegengesetzte Magnetismus dagegen nicht tief; auf dem Raume seines Eindringens neutralisire er den entgegengesetzten Magnetismus, bleibe aber, wenn die schwächere Kraft lange genug gewirkt habe, in der oberen Schicht nach der Neutralisirung auch noch vorhanden. Demnach liegen in einem solchen Stabe 2 entgegengesetzt magnetische Schichten übereinander, die sich in ihrer Wirkung nach außen aufheben und so den Stab scheinbar neutralisiren. Eine neue entgegengesetzte Magnetisirung durch eine abermals geringere Kraft vermag diese obere Schicht nicht zu ändern, hebt also die Neutralität nicht auf; eine neue ursprüngliche Magnetisirung neutralisirt dagegen die obere Schicht und bringt daher den ursprünglichen Magn. der tieferen Schicht wieder zur Wirksamkeit. Daß wirklich die 2 verschiedenen magnetischen Schichten übereinander liegen, hat Jamin durch das Abätzen der oberen entgegengesetzten Schicht nachgewiesen, indem nach deren Beseitigung der ursprüngliche Magnetismus wieder hervortrat. Auch durch Versuche mit einer Stahlröhre, die einen Stahldraht als „Seele" enthielt, wird die angeführte Erklärung bekräftigt. Eine schwächere Kraft magnetisirte nur die Röhre, eine stärkere auch die Seele; wurde zuerst die Röhre für sich und die Seele für sich entgegengesetzt magnetisirt, so ergab sich beim Einführen der Seele die Wiedemann'sche Neutralität.

Das Uebereinanderlegen magnetischer Schichten gab Jamin (1875) die Möglichkeit der Erzeugung abnormer Magnete. Ein Magnet, der in den äußeren Schichten starken Magnetismus enthielt, in den mittleren aber entgegengesetzten und schwächeren, hatte durch die stärkere Wirkung der äußeren Schichten einen gewöhnlichen Süd- und Nordpol; nun wurde die Südhälfte in Säure getaucht; dann lösten sich die äußeren Südschichten auf und es kam der Nordmagnetismus der inneren Schichten zum Vorschein; folglich hatte schließlich dieser Magnet an beiden Enden einen Nordpol. Ein anderer Magnet wurde ebenfalls bis zum Uebergewichte der äußeren Schichten magnetisirt und dann so lange in Säure gelegt, bis an den Kanten und Ecken, wo die Aetzung am stärksten geschieht, der innere Magnetismus zum Vorschein kam, der hier eine große Spannung hat. Wenn nun ein anderer Magnet allmälig dem Stabende genähert wurde, so überwogen anfänglich die äußeren Schichten und zogen den Magnet an; später überwog der entgegengesetzte Magnetismus der Ecken und stieß denselben ab. Dieser Magnet wirkte also in größerer Entfernung anziehend, in kleinerer abstoßend, wie der von Galilei (1607) beschriebene, jedoch verloren gegangene magnetische Stein, der in 4″ Entf. anziehend, in 1″ Entf. abstoßend wirkte. Eine andere Art abnormer Magnete hatte Jamin schon 1872 angefertigt; an dem Knie einer fast meterlangen Hufeisenplatte saßen auf den 2 Schenkeln 2 kurze Spulen mit entgegengesetzt gewundenen Drähten, durch welche ein elektrischer Strom ging. Wurden nun die Spulen mehrmals von dem Knie nach den Schenkelenden zu hin und zurück bewegt, so wurde das Hufeisen ein Magnet, hatte jedoch seine Pole nicht an den Enden, sondern an den Stellen, bis zu welchen die Spulen vorangeführt worden waren. Solche abnormen Magnete waren indeß auch schon der älteren Physik bekannt; werden an einem längeren Stabe verschiedene an einander grenzende Theile mit entgegengesetzten Magnetpolen bestrichen, so werden die Theile auch entgegengesetzt magnetisch und enthalten mehrere polartige Maximalstellen, sogenannte Folgepunkte, die am besten durch aufgestreute Feilspäne sichtbar werden. Sie entstehen auch, wenn man an das eine Ende eines längeren Stabes einen Magnetpol für kürzere Zeit anlegt.

Auch Nickel und Kobalt lassen sich nach den angegebenen Methoden magnetisiren, jedoch bei Weitem nicht so stark als Eisen. Eine besondere Quelle von Magnetismus hat Tommasi (1875) gefunden; eine kupferne Röhre war spiralig um einen Eisencylinder gewunden und von Wasserdampf von hoher Spannung durchströmt; so lange der Strom dauerte, war das Eisen magnetisirt.

Die Tragkraft der Magnete. Unter der Tragkraft eines Magnetes versteht man das Gewicht von angezogenem und festgehaltenem Eisen, das der Magnet tragen kann. Man findet die Tragkraft eines Poles, indem man denselben mög- **454**

lichst eben schleift, einen ebenso eben geschliffenen Anker mit einer kleinen Wagschale darüber schiebt und auf die Schale Gewichte bis zum Abreißen legt. Dieses Gewicht mit dem der Schale und des Ankers zusammen verdoppelt gibt die Tragkraft des ganzen Magnetes. Die Tragkraft eines Hufeisenmagnetes ist bedeutend größer als die doppelte Tragkraft eines Poles. Nach Häcker (1844) ist die Tragkraft seiner möglichst gehärteten und möglichst stark magnetisirten Hufeisen $T = a\sqrt[3]{p^2}$, worin p das Gewicht des Hufeisens in kg und a einen constanten Coëfficient = 10,33 bedeutet. Die Tragkraft eines neuen Magnetes kann man durch allmäliges tägliches Zulegen auf das Doppelte steigern; sie sinkt dann durch Abreißen bis zur früheren Stärke herab. Die Tragkraft wächst zwar mit der Stärke des Magnetismus, ist aber kein Maß derselben, weil sie nicht in einfachem Zusammenhange mit derselben steht, nicht, wie man aus der Vertheilung schließen könnte, im directen Verhältnisse zum Quadrat der magnetischen Anziehung wächst.

Wenn nämlich ein Magnet 3mal stärker wird, so zieht er den vor ihm liegenden Anker 3mal stärker an; er erweckt aber auch in demselben 3mal stärkeren Magnetismus durch Vertheilung, so daß die 3mal stärkere Anziehung des M. abermals verdreifacht wird, also 3^2mal größer wird. Diese Ableitung setzt voraus, daß die Berührung des Ankers keine Veränderung der magnetischen Constitution zur Folge habe, eine Voraussetzung, die nicht berechtigt ist. Aus dieser vertheilenden Wirkung folgt indeß leicht der Satz über die Tragkraft des Hufeisens; der Nordpol desselben zieht Südmagnetismus des Ankers an und stößt Nordmagnetismus desselben gerade unter den Südpol; genau dieselbe Wirkung auf den Anker hat auch dieser Südpol, die Polarität des Ankers ist daher viel stärker als durch einen Pol allein; folglich ist auch die Anziehung an jedem Pole stärker als an einem Pole allein, die Tragkraft ist daher mehr als die doppelte eines Poles.

Nach Häckers Formel würde ein M. von 0,657kg eine Tragkraft von 7,807kg haben, während Elias einem solchen eine Tragkraft von 10kg gab. Aus jener Formel folgt eine langsame Zunahme der Tragkraft mit dem Gewichte, so daß bei 1104kg die Tragkraft gleich dem Gewichte ist; außerdem folgt aus derselben, daß das Verhältniß T : P mit steigendem Gewichte immer kleiner wird, daß aber bei sehr kleinen Gewichten die Tragkraft das Gewicht stark übertrifft. Nach jener Formel würde ein Magnet von 1 Pfd. das 13fache, von 1kg das 10fache, von 3kg das 7fache seines Gewichtes, ein mehr als 1104kg schwerer Magnet aber weniger als sein Gewicht tragen. Die in der Formel ausgesprochene langsamere Zunahme der Tragkraft als des Gewichtes ist auch vollkommen richtig; jedoch kann den Magneten noch eine höhere Tragkraft verliehen werden; denn Hoffer und Logeman haben ganz kleine M. angefertigt, bei denen die Tragkraft das Gewicht mehr übertrifft, als Häckers Formel angibt, Hoffer einen M. von 22 Loth Gewicht, der 10 Pfunde trug, und Logeman einen M. von 1 Pfd. Gewicht, der 31 Pfd. tragen konnte; Häcker selbst fertigte 1 M. von 1 Loth, der das 32fache, von 1 Pfd., der das 12fache, und von 40 Pfd., der das 4fache seines Gewichtes trug, und Carl gibt an, daß er kleine Magnete von wenigen Grammen angefertigt habe, die mehr als das 100fache ihres Gewichtes zu tragen vermochten. Jamin (1869) construirte zuletzt ein Hufeisen von 100kg, das 8 Tage lang 680kg, beständig aber 140kg tragen konnte.

Mit der Untersuchung und Erhöhung der Tragkraft hat sich Jamin in den letzten Jahren vielfach beschäftigt. Zuerst (1872) machte er darauf aufmerksam, daß die Wirkung des Ankers nicht blos von seiner Influenzirung herrühre, sondern auch von der Condensation, daß er nämlich den dem Pole gleichnamigen Magnetismus großentheils nach dem Pole hinziehe. Der Magnetismus eines Poles und des ihn berührenden Ankertheiles, die wegen ihrer entgegengesetzten Natur die starke Anziehung bewirken, heben sich aus demselben Grunde in ihrer Wirkung nach außen auf. Legt man daher auf einen verankerten Magnet kleine Contacte, so findet man, vorausgesetzt, daß der Anker weder zu groß noch zu klein ist, direct am Anker keine Abreißungskraft; von dem Anker nach der Indifferenzzone zu wächst dieselbe zuerst eine Strecke weit und nimmt dann wieder ab. Hiermit erklärt sich das von Trève (1873) besprochene Wandern der Pole mit dem Gewichte und der Größe des Ankers. Der Magnetismus, welcher hiernach in den Schenkeln eines Hufeisens nach der Ankerlegung noch vorhanden ist, kann nach Jamin an die Pole geführt werden, indem man mit einer weichen Eisenplatte mehrmals von dem Knie nach den Polen zu reibt, wodurch die Tragkraft bedeutend verstärkt wird. Denselben Erfolg hat im Laufe längerer Zeit die Anziehung des Ankers, wodurch es sich erklärt, warum durch allmäliges Zulegen die Tragkraft eines Magnetes erhöht wird; beim Abreißen aber fließt der so con-

densirte Magnetismus wieder zurück, womit sich die Verminderung der Tragkraft durch Abreißen erklärt. Der Anker darf nicht zu klein sein, weil er sonst mehr freien Magnetismus auf den Schenkeln zurückläßt, und nicht zu groß, weil sonst ein Theil des Hufeisenmagnetismus zur Erzeugung von freiem Ankermagnetismus verbraucht wird.

Da der Magnetismus selbst durch die stärkste magnetisirende Kraft nur bis in eine gewiße Tiefe eindringt, so kann man durch Vergrößerung der Dicke über eine gewisse Grenze hinaus keine Verstärkung der Tragkraft gewinnen; es scheint demnach die Häcker'sche Formel, nach welcher ohnedies der Magnetismus viel langsamer als das Gewicht wächst, nur bis zu einer gewissen Grenze zu gelten. Zu weiterer Verstärkung der Tragkraft legt man daher mehrere Magnete mit gleichnamigen Polen zu einem magnetischen Magazin auf einander. Es wurde indeß schon angedeutet, daß die Tragkraft eines Magazins viel kleiner als die Summe der Tragkräfte der Einzelmagnete ist. Als Jamin (1873) 6 gleiche Magnete von 3kg Gewicht und 18kg Tragkraft auf einander legte, hatte das Magazin nicht die Tragkraft von 6 . 18 = 108, sondern nur von 64kg, und nach der Zerlegung des Magazins hatte jeder Magnet nur noch 9 bis 10kg Tragkraft; durch die Verbindung hat also jeder Magnet eine bedeutende Schwächung erfahren. Man kann diese Schwächung auf folgende Weise mittels der Influenz erklären. Der Nordmagnetismus irgend eines Magnetes zerlegt neutralen Magnetismus einer Nachbarplatte, zieht den ungleichnamigen in die Berührungsfläche und neutralisirt dadurch diesen und sich selbst und einen Theil des Nordm. der Platte; der abgestoßene gleichnamige Magnetismus aber geht in das Innere der Nachbarplatte und kann daher nicht nach außen wirken. Man kann auch die Erklärung mittels der Molekularmagnete vornehmen: wird auf ein Magazin ein neuer Magnet gelegt, so wirkt z. B. der ganze Nordmagnetismus des Magazins auf die Molekularmagnete des neuen Magnetes, die bekanntlich parallel zu den Schenkeln gerichtet sind, stößt deren Nordenden ab und zieht ihre Südenden an, wodurch sie sich auf die Schenkel senkrecht stellen müssen, also eine Lage annehmen, die den Magnetismus aufhebt. Es ist klar, daß diese Drehung um so vollständiger geschehen muß, je stärker das Magazin ist, daß also über eine gewisse Zahl hinaus eine weitere Zulage wirkungslos ist, was die Versuche Jamins bestätigen. Ebenso ist leicht zu ersehen, daß dünne Platten günstiger wirken als dicke, auch schon deßhalb, weil solche durch und durch magnetisirt werden können. Jamin verwendet daher zu seinen starken Magneten (Jamin-Magnete) dünne Stahllamellen, sogar Federstreifen. Um die schwächende Einwirkung der gleichnamigen Pole zu vermindern, gibt man den Magneten eine verschiedene Länge, legt zu beiden Seiten des längsten zwei etwas kürzere so an, daß die Kniestellen zusammenfallen, die Pole aber nicht, und fährt so fort. Jamin suchte (1873) dasselbe Ziel durch Anker zu erreichen. Wenn nämlich vor jedem Einzelmagnet ein Anker liegt, so condensirt derselbe den Magnetismus, bindet ihn, so daß er nicht nach außen wirken, also auch nicht die übrigen Magnete schwächen kann. Jamin legte daher die Stäbe einen nach dem anderen an einen Anker von hinreichender Masse, oder er versah jedes Hufeisen mit einem Anker, legte dann die verankerten Magnete zusammen, verschraubte die Magnete und die Anker, und erhielt so von den 6 genannten Hufeisen eine Tragkraft von 115kg, sogar mehr als die Summe der Tragkräfte der Einzelmagnete. Diese Tragkraft ist jedoch eine vorübergehende; denn sowie der Anker abreißt, ist seine bindende oder neutralisirende Wirkung zu Ende, die Einzelmagnete influenziren sich wieder, und die Tragkraft sinkt, in dem Jamin'schen Versuch wieder auf 54kg.

Die dauernde Tragkraft suchte Jamin durch Armaturen zu steigern. Früher verstand man unter Armaturen die Metallbänder, welche zum Zusammenschrauben der Theile eines Magazins dienten, oder die Metallfassung, die einem natürlichen Magnet gegeben wurde, um ihn zum Tragen zu benutzen; man schrieb diesen Armaturen eine verstärkende Wirkung zu, die von Eisenlohr bestritten wurde. Jamin versteht jetzt unter Armaturen weiche Eisenplatten, die an einen oder mehrere Magnete so angelegt werden, daß dieselben ein wenig über die Polflächen herausragen und dann durch einen Anker verbunden werden. Werden nun die Magnete beim Aneinanderlegen zugleich an Armaturen angesetzt, so steigern diese die Tragkraft; denn sie neutralisiren jedenfalls einen Theil des Stabmagnetismus, so daß die Stäbe sich nicht so stark durch Influenz schwächen können. So legte Jamin zwischen die 3 ersten und die 3 letzten der oben genannten 6 Magnete 2 Armaturen von 1,8kg und verband dieselben durch einen Anker; jetzt hatten sie eine Tragkraft von 107kg, und nach dem Abreißen des Ankers eine dauernde Tragkraft von 82kg. Als schwere Armaturen, jede von 3kg genommen wurden, erhob sich sogar die dauernde Tragkraft auf 93kg. Da die Armaturen das Aufeinanderwirken der Magnete schwächen, so erhalten sie die Tragkraft der Einzelmagnete, wie sich durch Versuche nach dem Auseinanderlösen des Magazins ergab. — In seinen späteren Arbeiten (1875) verläßt Jamin das zur Erklärung der Anker- und Armaturwirkung benutzte Princip der Neutralisation des Magnetes und

benutzt das inzwischen (1874) aufgestellte Princip der magnetischen Leitung. Er legt zunächst an einen Pol eines Magnetstabes eine Armatur, die nur eine Verlängerung des Stabes ist, und sagt, allerdings dem Princip der Erhaltung der Kraft gemäß, durch diese Anlegung werde weder Magnetismus erzeugt noch aufgehoben, sondern es fließe nur ein Theil des Polmagnetismus auf die Armatur über, da dieselbe ein guter Leiter sei; die anfangs vorhandene Summe von Magnetismus aber sei ungeändert geblieben. Als er jedoch nach seiner Contactmethode die Menge des Magnetismus untersuchte, fand er, daß der Magnet 27 verloren, die Armatur 60 gewonnen habe; dieser Gewinn, sagt Jamin, sei nur scheinbar, und rühre davon her, daß der Contact auf der Armatur aus einem viel weiteren Umkreise Magnetismus herbeiziehen könne als auf dem Stahl, weil der letztere ein schlechter Leiter sei, eine größere Coërcitivkraft habe; und das Verhältniß 0,45 zwischen dem Verlust des Stahles und dem Gewinne der Armatur gebe das Verhältniß der Leitungsfähigkeiten an; die Leitungsfähigkeit des Stahles sei 0,45, wenn die des Eisens = 1 sei, und die in umgekehrtem Verhältnisse dazu stehende Coërcitivkraft des Stahles sei 2,2, wenn die des Eisens als Einheit gelte. Zu dieser Anschauung hielt sich Jamin um so mehr berechtigt, als er für denselben Stahl unter allen Umständen dieselben Zahlen, für verschiedene Stahle verschiedene Zahlen fand; die Leitungsfähigkeiten des Stahles vom weichsten bis zum härtesten liegen hiernach zwischen 0,8 und 0,17, die Coërcitivkräfte zwischen 1,25 und 5,9. Hiermit erklärt Jamin, warum nach seiner Messungsmethode sehr harte Stäbe geringen Magnetismus zeigten; und durch das Ueberfließen des Magnetismus auf die Armaturen erklärt er das Steigern der Tragkraft durch die Armaturen, da die so geschwächten Magnete sich gegenseitig dann weniger beim Zusammenlegen schwächen könnten. — Nach den letzten Forschungen von Jamin wirken die Armaturen noch in zwei anderen Beziehungen verstärkend; sie gestatten nämlich, die Zahl der aufeinander zu legenden Magnetstäbe, welche bekanntlich ohne Armaturen bald ein nutzlos zu überschreitendes Maximum erreicht, noch viel weiter mit fortwährender Zunahme der Tragkraft zu steigern, vorausgesetzt, daß die Armaturen schwer und groß genug sind. Außerdem aber steigern sie die magnetische Kraft, wenn sie schon vor dem Magnetisiren angelegt werden, vorausgesetzt jedoch, daß die Stäbe unterhalb einer gewissen Länge bleiben. Die erste Thatsache wird sowohl nach dem Princip der theilweisen Neutralisation, als nach dem der Leitung leicht verständlich sein. Um die letzte zu erklären, geht Jamin auf seine Anschauung über das Wesen des Magnetismus ein, die sich, obschon Jamin'sche Versuche gegen Ampères Theorie vorliegen, doch aus dieser Theorie, sowie aus der Theorie der Molekularmagnete, die mit jener zusammenstimmt, ableiten läßt. Nach diesen Theorien muß nämlich ein Molekularmagnet den entgegengesetzten Pol des vor ihm liegenden anziehen und den gleichnamigen abstoßen, so daß die beiden Molekularmagnete in einer geraden Linie liegen; daraus folgt, daß die Molekularmagnete von Pol zu Pol gerade Linien bilden müssen, daß also ein Magnet aus zahlreichen magnetischen Fäden besteht, die parallel neben einander lägen, wenn sie nicht auf einander einwirkten. Da sie sich jedoch nach ihren Enden zu einander abstoßen, so liegen die Fadenpole nicht blos auf den Stirnflächen, sondern auch auf den Seitenflächen, wodurch sich ebenfalls die von den Stirnflächen nach der Mitte zu verschobene Lage der Magnetpole erklärt. Nach Jamin liegen nun in einem langen schwachen Magnet die Fadenpole fast alle auf der Stirnfläche, so daß die Curven des freien Magnetismus sehr kurz sind; einen solchen Magnet nennt Jamin unvollständig gefüllt. Finden sich aber auch Fadenpole auf den Seitenflächen bis zur Indifferenzzone, so ist der Magnet vollständig gefüllt. Ist jedoch ein Stab zu kurz, um alle Fadenpole aufzunehmen, so ist die Oberfläche zu klein; dann hat die Armatur den Erfolg, die Oberfläche zu vergrößern, so daß alle Fadenpole auf ihr Platz finden; in diesem Falle bringt das Magnetisiren bei angelegten Armaturen eine Verstärkung hervor. Durch Anwendung dieser Principien gelang es Jamin, Magnete von erstaunlich großer Tragkraft im Verhältnisse zum Gewichte der Magnete zu erhalten.

Die anderen Wirkungen des Magnetismus außer der Tragkraft, die Verlängerung oder Verkürzung von Eisen- und Stahlstäben, die Aenderung der Leitungsfähigkeit von Kupferdraht, die Drehung der Polarisationsebene, die Wirkung auf das Licht der Geißler'schen Röhren und auf dessen Spectrum s. 526., 527., 531.

455 **Die magnetische Intensität**, das magnetische Moment (Gauss, **Intensitas vis magneticae terrestris in mensuram absolutam revocata. 1833**). Die magnetische Kraft eines Magnetes, die magnetische Intensität besteht nach der hergebrachten Anschauung in der Menge der von einander geschiedenen zwei Magnetismen und wird durch das magnetische Moment gemessen, d. i. durch die Summe der Producte der magnetischen Intensitäten aller magnetischen Theilchen mit ihren Abständen von der

Drehachse; denn die Arbeit für die Trennung der entgegengesetzten Magnetismen von einander ist offenbar um so größer, je weiter dieselben aus einander gebracht wurden, und dieser größeren Arbeit muß auch eine größere Wirkung, eine größere magnetische Intensität entsprechen. Indessen können wir das magnetische Moment nicht bestimmen, da uns der Einblick in das Wesen des Magnetismus, in die Kraft und Menge der Theilchen fehlt. Wir können daher die magnetische Intensität nur durch die Wirkung der Magnete bestimmen; da die Tragkraft kein Maß für die Stärke des Magnetismus ist, so hat man die zweite Wirkung des Magnetes, die Richtkraft als Maß vorgeschlagen, d. i. die Kraft, mit welcher der frei aufgehängte, aus seiner Ruhelage gebrachte Magnet sich in dieselbe zurück dreht. Die Wirkung einer drehenden Kraft aber ist bekanntlich um so größer, je größer ihr statisches oder Drehungsmoment, das Product der Kraft mit dem Hebelarme ist. Nun erfährt eine Nadel, wie leichte Versuche zeigen, die stärkste Wirkung, wenn sie auf der Ruhelage senkrecht steht, und eine um so schwächere Drehung, je näher sie der Ruhelage kommt, und in der Ruhelage selbst erleidet sie keine Drehung. Dies kann nur daher rühren, daß in dem letzten Falle der Hebelarm gleich Null, in dem ersten am größten ist; hieraus folgt einfach, daß die drehende Kraft die Richtung der Ruhelage, des magnetischen Meridians besitzt. Da diese Lage nur von dem Orte auf der Erde abhängig ist, so muß die richtende Kraft der Erde zugeschrieben werden. Die Richtkraft, welche ein Magnetstab erfährt, hängt also zunächst von der richtenden Kraft, dem Magnetismus der Erde ab; dieser ist zwar an verschiedenen Orten verschieden und wechselt sogar ein wenig an demselben Orte im Laufe der Zeiten; aber er bleibt doch so lange derselbe, daß er zur Vergleichung der magnetischen Kraft verschiedener Magnete benutzt werden kann. Denn von dieser hängt die Richtkraft zweitens ab, da ein Magnet um so rascher in den Meridian zurückkehrt, je stärker er ist. Wäre das magnetische Moment eines Stabes bekannt, so würde in einem Maße der Richtkraft das Product desselben mit der richtenden Kraft der Erde vorkommen; da aber jenes nicht bekannt ist, so suchen wir umgekehrt die magnetische Intensität aus der Richtkraft zu bestimmen, indem wir an einem und demselben Orte vom Einflusse der Erde absehen können. Gauß hat die Richtkraft in absolutem Maße ausgedrückt, indem er die Kraft als Einheit aufstellte, welche der Masse von 1^{mg} mit dem Hebelarme von 1^{mm} in 1 Sec. eine Drehbeschleunigung von 1^{mm} ertheilt. Wird die Richtkraft in solchen Einheiten ausgedrückt, so bedeutet dies, daß sie im Stande wäre, einer ebenso großen Masse im Abstande von 1^{mm} von einer Drehachse in 1 Secunde die Beschleunigung von 1^{mm} zu ertheilen. Zur Bestimmung der Größe der Richtkraft dient die Formel $P = \pi^2 k : t^2$, worin k das Trägheitsmoment (in mg und mm ausgedrückt) und t die Zeit (in Sec. ausgedrückt).

Diese Formel folgt aus der bekannten Pendelformel $t = \pi \sqrt{(l : g)}$, worin l bekanntlich gleich dem Abstande des Angriffspunktes der bewegenden Kraft von der Drehachse, und worin g die Beschleunigung bedeutet, welche die bewegende Kraft der Masse ertheilt, die in dem Angriffspunkte die Masse des schwingenden Körpers ersetzt. Da wir uns nun die Richtkraft in dem Abstande 1 angebracht denken, so ist die ersetzende Masse gleich dem Trägheitsmoment k der Nadel, sodann $l = 1$, und endlich ist g, die Beschleunigung, gleich der Kraft dividirt durch die Masse $= P : k$. Setzen wir diese Werthe in die Formel für t ein, so ergibt sich $t = \pi \sqrt{(k : P)}$, woraus $P = \pi^2 k : t^2$. Zur Bestimmung von P sind demnach die Bestimmungen des Trägheitsmomentes k und die Schwingungszeit t nöthig. Gauß hat zunächst für die Bestimmung der horizontalen Richtkraft der Erde sein Magnetometer construirt; dasselbe besteht aus einem an Coconfäden aufgehängten Messingschiffchen, das den Magnetstab trägt, der mit einem genau auf der magnetischen Achse senkrechten Spiegel versehen ist, und einem Theodolith, dessen verticale Achse mit dem Faden in der Ebene des magnetischen Meridians liegt, und das an seinem Stativ einen 1^m langen in mm getheilten Stab trägt, dessen Bild in dem Stabspiegel durch das Fernrohr gesehen werden kann. Ist der Apparat genau aufgestellt, so bringt man den Magnetstab durch einen anderen Magnet aus seiner Lage, und beobachtet dann die Zeiten, in welchen ein

und derselbe Theilstrich der Skale an dem Fadenkreuz des Fernrohres vorbeigeht; so findet man die Schwingungszeit t. Um das Trägheitsmoment k zu bestimmen, legt man über den Stab eine Holzleiste mit zwei gleichen angehängten Gewichten von bekanntem Trägheitsmoment; aus der nun stattfindenden Veränderung der Schwingungen kann man das Trägheitsmoment k finden. So kann man nun die Richtkraft bemessen, welche der Magnet Erde auf einen anderen Magnet ausübt; in ähnlicher Weise ist auch die Aufgabe zu lösen, welche Richtkraft ein Magnet auf eine Nadel ausübt; wenn dieselbe den Einfluß der Erde bedeutend überwiegt, so weicht diese Aufgabe nicht viel von der eben besprochenen ab, dagegen wird sie sehr verwickelt, wenn die Erde mitwirkt. Auch gibt in diesen Fällen die ausgeübte Richtkraft keinen vollständigen Aufschluß über die magnetische Intensität, weil die erstere bei gleicher Intensität in verschiedenen Entfernungen verschieden ist. Wir haben daher noch den Einfluß der Entfernung zu betrachten.

456 **Die magnetische Fernewirkung** (Coulomb 1785, Gauß 1833). Ist die Entfernung zweier Magnete so klein, daß Anziehung oder Abstoßung für sich allein zur Wirkung kommen, so gilt das Gesetz: Die Anziehung oder Abstoßung steht im umgekehrten Verhältnisse zu dem Quadrat der Entfernung. Dieser Satz ist von Gauß mathematisch bewiesen, aber schon lange vorher von Coulomb auf zwei verschiedene Arten experimentell aufgefunden worden: 1. Die Schwingungsmethode; 2. die Coulomb'sche Drehwage.

1. Bringt man eine frei auf einer Spitze schwebende oder an Coconfäden hängende Nadel in die Nähe eines Magnetes, so nimmt sie gegen diesen eine bestimmte Lage an; bringt man sie aus dieser Lage heraus, so kehrt sie vermöge der Anziehung des Magnetstabes in die Lage zurück, schwingt nach dem Gesetze der Trägheit über dieselbe hinaus und gelangt erst nach einer Reihe von Schwingungen zur Ruhe. Diese Schwingungen geschehen um so rascher, je größer die zurückführende Kraft, die Richtkraft ist. Diese aber ist, wie oben abgeleitet, $P = \pi^2 k : t^2$; für eine andere Entfernung von dem Magnet ist sie $P_1 = \pi^2 k : t_1{}^2$, woraus durch Division folgt $P : P_1 = t_1{}^2 : t^2$. Da nun die Schwingungszahlen n und n_1 sich umgekehrt wie die Schwingungszeiten verhalten, so ist $t_1{}^2 : t^2 = n^2 : n_1^2$, und hieraus $P : P_1 = n^2 : n_1^2$, d. h. die Richtkräfte einer Nadel bei verschiedenen Entfernungen verhalten sich wie die Quadrate der Schwingungszahlen. Coulomb ließ eine 15cm lange Nadel allein, d. i. durch den Erdmagnetismus schwingen und fand 15 Schw. per Min.; dann ließ er sie in 4″ Entf. von dem einen Pole eines großen Stabes schwingen und fand 41 Schw.; endlich erhielt er in 8″ Entf. 24 Schw.; nennen wir die Richtkraft des Erdmagnetismus E, so ist nach obigem Satze $E : E + P = 15^2 : 41^2$ und $E : E + P_1 = 15^2 : 24^2$; hieraus $P : P_1 = 41^2 - 15^2 : 24^2 - 15^2$ oder wie 4 : 1, d. h. im umgekehrten Verhältnisse zu den Quadraten der Entfernungen 4″ und 8″.

2. Die Coulomb'sche Drehwage besteht aus einem weiten Glascylinder, der mit einer in der Achse des Cylinders durchbohrten Glasplatte bedeckt ist; in diese Durchbohrung ist eine Glasröhre eingekittet, die oben eine durchbohrte Deckelfassung mit einem drehbaren Knopfe trägt, von welchem ein feiner Silberdraht in den Cylinder hinabgeht. Die Deckelfassung ist mit einem getheilten Kreise versehen, auf dem ein vom Knopfe ausgehender Zeiger spielt. Der Silberdraht trägt unten im Cylinder ein Messingschiffchen, in welchem ein Magnetstäbchen liegt, in dessen Höhe die Cylinderwand ebenfalls eine Kreistheilung trägt. Der Apparat wurde so aufgestellt, daß sich der Stab im magnetischen Meridian befand, ohne daß der Draht irgend eine Verwindung oder Torsion hatte, während vorher festgestellt war, daß um den Stab um 1° aus dem magnetischen Meridian herauszudrehen, an dem Drahte eine an der Deckelfassung abzulesende Torsion von 35° vorgenommen werden mußte. Dann wurde durch eine zweite Oeffnung des Cylinderdeckels dem Nordpole des Stabes der Nordpol eines anderen Magnetes genähert, wodurch derselbe um 24° abgestoßen wurde; darauf wurde am Kopfe gedreht, um den Stab in seine frühere Lage zurückzubringen; es waren 3 Umdrehungen nöthig, um die Ablenkung auf 17°, und 8 Umdrehungen, um sie auf 12° zu vermindern, so daß in den 3 Fällen die Entf. sich verhielten wie 24 : 17 : 12. Im ersten Falle war die Ablenkung = 24.35° in Torsion des Fadens ausgedrückt, vermehrt um diese Torsion selbst = 24.35 + 24 = 864°; im 2. Falle = 17.35 + 3.360 + 17 = 1692, im 3. = 12.35 + 8.360 + 12 = 3312; die abstoßenden Kräfte in den Entfernungen 24 : 17 : 12 verhielten sich also wie 864 : 1692 : 3312, was eine leichte Rechnung wieder in Uebereinstimmung mit dem umgekehrten Verhältnisse der Quadrate der Entfernung zeigt.

Ist die Entfernung so groß, daß nicht blos die Anziehung oder Abstoßung des Stabes allein, sondern beide Kräfte zusammen auf die Nadel wirken, so steht die Anziehung im umgekehrten Verhältnisse zum Cubus der Entfernung.

Beweis. Die Pole des Stabes seien N und S, die der Nadel n und s, die Stablänge $= 2a$, so ist $Ns = r - a$ und $Ss = r + a$, vorausgesetzt, daß N der Nadel zugewendet und daß die Nadelrichtung zur Stabrichtung senkrecht ist. Ist nun die Anziehung von N und s in der Entf. $1 = q$, so ist sie in unserer Entf. $r - a$ gleich $q : (r - a)^2$; ebenso ist die Abstoßung $Ss = q : (r + a)^2$. Da N näher ist als S, so überwiegt die Anziehung um $q : (r - a)^2 - q : (r + a)^2 = 4arq : (r^2 - a^2)^2$. Ist nun a sehr klein gegen r, so kann in dem Nenner a vernachläßigt werden; derselbe wird r^4, folglich die Anziehung $= 4aq : r^3$.

457 **Einfluß anderer Kräfte auf den Magnetismus.** a. Mechanische Kräfte. Erschüttert man einen Stab, während er magnetisirt wird, so wird sein Magnetismus stärker; erschüttert man einen fertigen Magnet, so wird sein Magnetismus geschwächt. Wird ein Magnet durch entgegengesetztes Magnetisiren entmagnetisirt, so gewinnt er durch Erschüttern einen Theil seines Magnetismus wieder (Wiedemann 1857). Von besonderem Einflusse ist die Torsion oder Verwindung eines Magnetstabes auf seinen Magnetismus, wobei die interessante Erscheinung beobachtet wurde, das der Magnetismus die Torsion gerade so beeinflußt, wie die Torsion den Magnetismus. So nimmt der permanente Magnetismus von Stahlstäben durch Torsion ab, und zwar langsamer, als die Torsion wächst; ganz ebenso nimmt die permanente Torsion gedrehter Eisendrähte durch ihre Magnetisirung ab, und zwar langsamer, als der Magnetismus wächst. Wiederholte Torsionen in gleichem Sinne vermindern den Magnetismus kaum noch; eine Torsion im entgegengesetzten Sinne wie die erste bewirkt aber eine neue Verminderung des Magnetismus. Ganz analog vermindern wiederholte Magnetisirungen in gleichem Sinne die Torsion kaum noch; dagegen eine Magnetisirung im entgegengesetzten Sinne wie die erste bewirkt eine neue Verminderung der Torsion. Diese und andere ähnliche von Wiedemann (1859) aufgefundene Erscheinungen weisen darauf hin und erklären sich dadurch, daß die Magnetisirung in einer Drehung der Molekularmagnete besteht.

b. Die Wärme. Nach älteren Versuchen (Kupfer) nimmt die Magnetisirbarkeit von weichem Eisen bei Erhöhung der Temperatur bis zur dunkeln Rothglühhitze zu; Wiedemann hat gezeigt, daß dies bei jeder Temperaturänderung, also auch bei der Abkühlung, aber nur bei der ersten stattfindet; über der dunkeln Rothglühhitze nimmt der temporäre Magnetismus des Eisens ab; auch andere paramagnetische Metalle verlieren in der Hitze ihren temporären Magnetismus, Nickel in siedendem Mandelöl, Kobalt in der Weißgluth; bei der Abkühlung kehrt die magnetische Eigenschaft wieder, oft in erhöhtem Grade. Permanente Magnete werden durch Erhöhung der Temperatur geschwächt, ja verlieren in einem gewissen Hitzegrade ihren Magnetismus ganz. Magneteisensteine verlieren ihre Kraft bei der Rothglühhitze, Stahlstäbe schon bei 350°. Die Schwächung durch Erhöhnng der Temperatur ist theilweise vorübergehend, theils dauernd; der dauernde Verlust ist bei der ersten Erwärmung am größten, bei jeder folgenden kleiner und hört endlich ganz auf. Der dauernde Verlust ist nach Moser und Rieß (1830) größer bei harten Stäben als bei weichen, bei hohlen größer als bei massiven, bei kürzeren größer als bei längeren; er nimmt mit der Dicke des Stabes und mit der Höhe der Temperatur zu.

c. Das Licht. Morichini hatte behauptet, daß eine Stahlnadel magnetisch werde, wenn man ihre eine Hälfte in den blauen oder violetten Theil des Sonnenspectrums bringe, Miß Sommerville gab an, daß dasselbe geschehe, wenn man die eine Hälfte mit blauem Bande umwickele und dem Sonnenscheine aussetze. Moser und Rieß zeigten jedoch, daß diese Angaben auf Täuschung beruhen.

d. Chemische Kräfte. Wiedemann 1865—68 untersuchte den Magnetismus der Salze magnetischer Stoffe und fand folgende Sätze: der Magnetismus der Salzlösung ist gleich der Summe der Magnetismen des Wassers und des gelösten Salzes, und der des letzteren ist proportional dem in der Raumeinheit enthaltenen Gewichte desselben und unabhängig von der Natur des Lösungsmittels; da indessen das Wasser diamagnetisch ist, so ist der Paramagnetismus der Lösung kleiner als der des Salzes. Der Magnetismus der Lösung wird geringer, wenn die Temperatur höher wird, und zwar geschieht die Aenderung bei allen Salzen nach demselben Gesetze. Der specifische Magnetismus, d. i. das in der Gewichtseinheit Salz durch die Einheit der magnetischen Kraft erregte magnetische Moment, multiplicirt mit dem Atomgewichte des Salzes gibt ein constantes Product, oder der temporäre Magnetismus eines Metallatoms ist in allen chemischen Verbindungen derselbe; dagegen vermehrt sich dieser Atommagnetismus, wenn die Lösung verdünnter wird. Eine merkwürdige Ausnahme bildet Kupferbromid, dessen beide Bestandtheile diamagnetisch sind, während die Verbindung paramagnetisch ist.

458 **Der Erdmagnetismus.** Die Erde ist ein Magnet, und zwar hat sie in der nördlichen Halbkugel Südmagnetismus, einen Südpol, und in der südlichen Halbkugel Nordmagnetismus, einen Nordpol. Dies ergibt sich aus folgenden 2 Betrachtungen:

1. Stellt man in der Nähe eines starken Südpoles viele Magnetnadeln auf, so richten alle ihre Nordpole nach diesem Südpole hin. Umgekehrt, wenn man beobachtet, daß viele Magnetnadeln ihre Nordpole nach einem Punkte hinrichten, dann muß dieser Punkt der Südpol eines Magnetes sein. Nun beobachtet man aber, daß die auf der nördlichen Erdhälfte aufgestellten Magnetnadeln ihre Nordpole nach Norden richten; folglich muß die Erde ein Magnet sein und im Norden einen Südpol, Südmagnetismus besitzen. Die umgekehrte Ueberlegung gilt für die Südhälfte der Erde.

2. Bringt man in die Nähe eines Magnetes ein Stück Eisen, so wird dasselbe selbst ein Magnet, und zwar hat es in der zugewandten Hälfte Nordmagnetismus, wenn es der Südhälfte eines Magnetes genähert wurde. Umgekehrt, wenn ein Stück Eisen in der Nähe eines Körpers ein Magnet wird, so muß jener Körper selbst ein Magnet sein, und zwar muß er da Südmagnetismus enthalten, wo die zugewandte Hälfte des Körpers nordmagnetisch wird. Nun werden aber Eisenstäbe in der Nähe der Erde Magnete; folglich muß die Erde selbst ein Magnet sein. Da diese Eisenstäbe in ihren unteren Theilen auf der nördlichen Erdhälfte nordmagnetisch sind, so muß die nördliche Erdhälfte südmagnetisch sein.

Zur Kenntniß des Erdmagnetismus gehört die Kenntniß seiner Stärke oder Intensität und seiner Richtung. Die Richtung wird durch die Declination und Inclination bestimmt, und die Intensität wird erhalten, indem man die horizontale Richtkraft der Erde bestimmt und diese durch den Cosinus der Inclination dividirt.

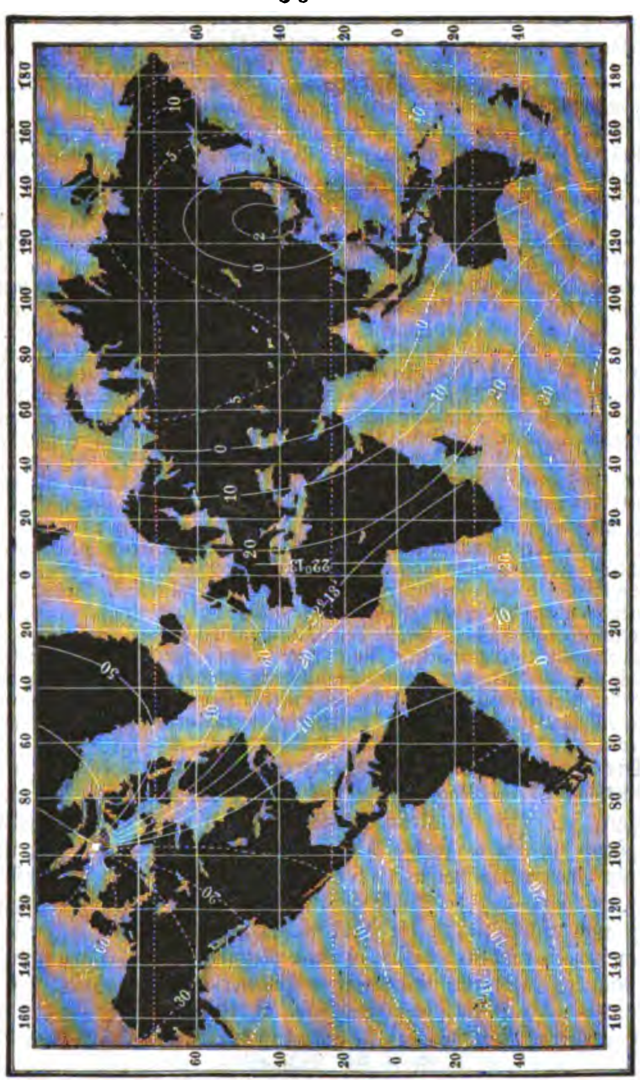
1. Die Declination ist der Winkel, den die Magnetnadel mit dem geographischen Meridian einschließt. Sie wird gemessen mittels des Declinatoriums. Die älteren Declinatorien waren einfach Boussolen, deren Mittellinie dem Fernrohre parallel war; das Fernrohr wurde in den Meridian gestellt, indem man z. B. einfach nach dem Nordpole des Himmels visirte; dann stand auch die Mittellinie im Meridian, und die Declination konnte direct abgelesen werden; sie war der Winkel, den die Nadel mit der Mittellinie bildete. Die größte Genauigkeit ist mit dem Gauß'schen Magnetometer zu erzielen; dasselbe wird zuerst genau in den magnetischen Meridian gestellt und dann in den geographischen Meridian gedreht; die Drehung ist leicht aus dem Wege zu berechnen, den das Fadenkreuz auf dem Spiegelbilde der Skale durchlaufen hat; da dieses Instrument fest und unnahbar mit dem Beobachtungszimmer des magnetischen Observatoriums verbunden ist, so hat Lamont (1841) einen magnetischen Reisetheodolit construirt.

Derselbe enthält auf einer messingenen Bodenplatte einen getheilten Silberkreis in einer zweiten durchbohrten Messingscheibe, durch welche ein drehbarer Zapfen geht, der einen dritten Messingkreis trägt; auf einer seitlichen Verlängerung desselben ist das Fernrohr, in einer Verticalebene drehbar angebracht, so daß seine Achsenverlängerung die Achse des ganzen Apparates schneidet; der bis jetzt beschriebene Theil des Apparates wird zuerst aufgestellt, und die Achse des Fernrohres in den geogr. Meridian gebracht. Dann wird auf die oberste Platte das Magnetgehäuse gestellt und zwar so, daß die zweimal durchbrochenen Seiten des unteren, rechteckigen Messingkastens auf der Achse des Fernrohres senkrecht stehen, und daß die Achse des oberen röhrenförmigen Theiles, in welchem der Coconaufhängefaden des Magnetstabes hängt, in die Achse der unteren Theile des Apparates fällt. Die obere Durchbrechung dient zur Aufnahme des Magnetstabes und ist außen durch Glasgehäuse umschlossen, die untere Durchbrechung fällt in die Verlängerung des Fernrohres und enthält einen mit dem Magnetstabe senkrecht fest verbundenen Spiegel. Statt des Fadenkreuzes ist in dem Fernrohre eine mit zwei auf einander senkrechten Linien versehene Glasplatte eingesetzt, deren Spiegelbild man durch das Fernrohr in dem Magnetspiegel sehen kann. Man dreht nach der Aufstellung des Magnetgehäuses die dritte Platte so lange, bis das Linienkreuz sein Spiegelbild deckt; dann ist das Fernrohr dem Magnet parallel, im magnetischen Meridian; die an dem getheilten Kreise abzulesende Drehung ist die Declination.

459 Die Declination ist zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten, und zu verschiedenen Zeiten an einem Orte verschieden. Doch gibt es Orte gleicher Declination; Linien, welche Orte gleicher Declination verbinden, werden isogonische Linien genannt (s. Fig. 237). Diese Linien gehen im Allgemeinen durch die beiden geographischen und die beiden magnetischen Erdpole. Die Linie, auf welcher die Declination = Null ist, wo also die Nadeln direct nach Norden zeigen, heißt Agone. Die Veränderungen der Declination nach der Zeit

nennt man Variationen; man unterscheidet säculare, jährliche und tägliche Variationen, sowie unregelmäßige Variationen oder Perturbationen; dieselben treten gewöhnlich zusammen auf mit Nordlichtern und stehen in einem noch unerklärten Zusammenhange mit den Sonnenflecken.

Fig. 237.



Die Agone, die Linie 0, geht vom geogr. zu dem magnetischen Südpole, durch das westliche Neuholland nach Arabien, schreitet auf der Grenze zwischen Europa und Asien durch den geogr. zum magnetischen Nordpole, zieht dann mitten durch Nordamerika und Brasilien wieder zum Südpole. Sie theilt die Erde in 2 Theile: Europa, Afrika und der atlantische Ocean haben westliche Decl., Asien, der große Ocean und Amerika östliche. Auf der Figur sind die Isogonen westlicher Decl. ausgezogen, die östlicher punktirt. Die Decl.

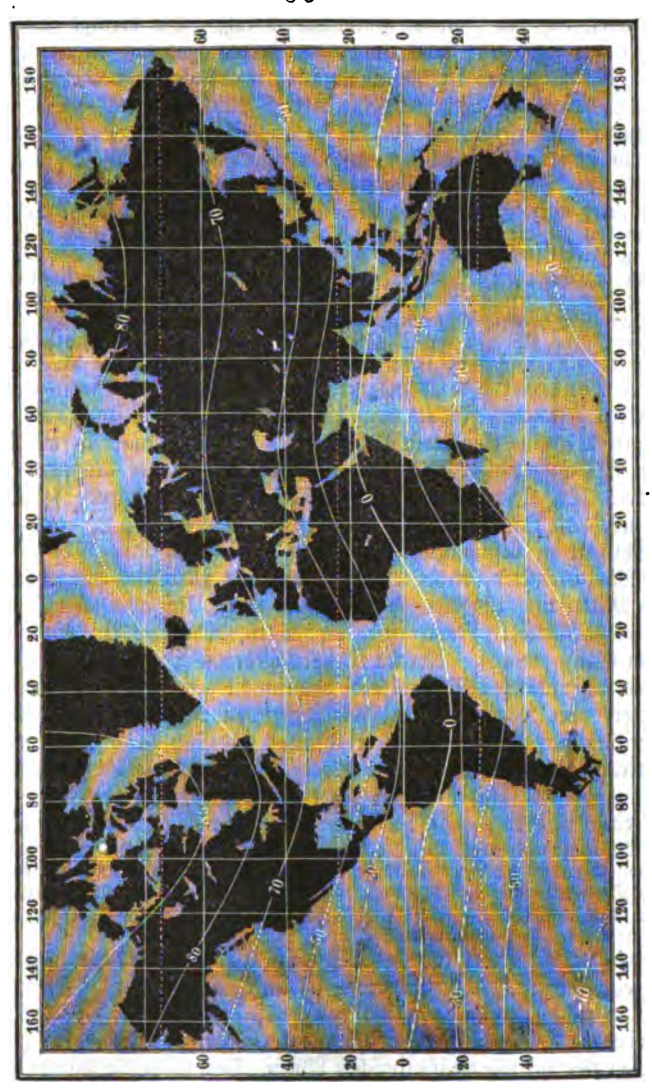
nimmt von der Agone an meist nach Osten und Westen hin zu; so ist sie in Moskau 2°, in Wien 10°, am Rhein 15°, in Paris 18°, in Irland 30°; in Asien nimmt sie nach Osten hin zuerst zu, dann ab und bildet sogar in China eine zweite in sich zurücklaufende Agone, innerhalb deren sie wieder westlich ist. Die Isogonen schneiden sich in den geographischen und in den magnetischen Polen; man hat die letzteren sogar vor ihrer Auffindung aus dem Laufe der Isogonen berechnet und sie nahezu so bestimmt, wie sie von den beiden Roß später gefunden wurden, den Nordpol in 70° n. B. und 97° w. L. und den Südpol in 66° s. B. und 146° östl. L. von Greenwich. — Die säcularen Variationen der Decl. sind aus folgenden Angaben für Paris ersichtlich: 1580 = 11° 30′ östl., 1618 = 8° östl., 1663 = 0°, 1700 = 8° westl., 1785 = 22° w., 1814 = 22° 34′ w., 1842 = 21° 25′ w., 1853 = 20° 17′ w.; die Decl. nahm also in 150 Jahren von 0° bis 22½° w. zu; würde der weitere Verlauf ähnlich sein, so ergäbe sich eine 600jährige Schwingung der Magnetnadel von 45°. Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß die westl. Decl. jetzt im Abnehmen begriffen, daß die Abnahme sehr langsam ist, aber allmälig zunimmt; sie betrug anfänglich, nach 1814 nur kaum 1′ per Jahr, macht aber jetzt 10′ aus. — Die jährliche Variation wird von Cassini (1786) für Paris folgendermaßen angegeben: von Januar bis April nimmt die Decl. zu, dann bis Anfang Juli ab, dann wieder zu bis April. Nach neueren Beobachtungen gilt dies nur für die Zeit der Zunahme der westl. Decl.; in unserem Viertel der 600jährigen Schwingung, wo die Decl. abnimmt, ist die Decl. in der Herbstnachtgleiche am größten und Ende April am kleinsten; auf der südlichen Halbkugel ist nach Brown (1874) die jährliche Variation im Ganzen entgegengesetzt; größte Werthe finden statt Anfangs Mai und Januar, kleinste Anfang October und März. Auch der Mondumlauf scheint wie der Sonnenumlauf kleine Variationen zu bewirken (lunare Variation). Die tägliche Variation besteht darin, daß sich das Nordende von 8 Uhr Morgens bis 2 Uhr Nachmittags nach Westen bewegt und dann wieder zurückkehrt; die tägliche Schwankung beträgt durchschnittlich 9′, ist nach dem Aequator zu etwas kleiner, und erfolgt auf der anderen Halbkugel in entgegengesetztem Sinne. Die tägliche Variation ist im Laufe eines Jahres veränderlich, nimmt aber auch 5 Jahre lang zu und 5 Jahre ab, um nach 10 Jahren wieder denselben Werth zu erreichen (Lamonts Periode). Wie die Decl. sich im Laufe der Zeiten ändert, so natürlich auch die isogonischen Linien und demnach die magnetischen Pole. Die Declinationskarte Fig. 237 gilt für das Jahr 1835. Die Störungen oder Perturbationen der Declinationsnadel, welche besonders gleichzeitig mit Nordlichtern, Erdbeben und Vulkanausbrüchen auftreten, bestehen darin, daß die Nadel sich unregelmäßig in kleinen Zuckungen bald nach Osten bald nach Westen bewegt. Sie sind an Orten von gleicher geographischer Länge gleichzeitig und in gleichem Sinne, nehmen aber nach dem Aequator zu an Größe ab, und sind südlich von demselben der Richtung nach den nördlichen entgegengesetzt. Auch nach Osten und Westen hin zeigen sich die Störungen in gleicher Art, nur nehmen sie allmälig an Stärke bis auf Null ab für Orte, die um 90° des Parallelkreises von einander entfernt sind; dann nehmen sie auf der anderen Hälfte desselben in entgegengesetzter Richtung zu und erreichen ein Maximum an dem Orte, der vom ersten Maximum um einen Halbkreis entfernt ist.

460 2. Die Inclination (Georg Hartmann 1543, Robert Norman 1576) ist der Winkel, den die Magnetnadel mit dem Horizont bildet. Sie muß hierbei entweder ganz frei, nur mit ihrem Schwerpunkte an einen Coconfaden aufgehängt oder wenigstens um eine wagrechte Achse drehbar aufgestellt sein. Der Apparat zur Messung der Inclination heißt Inclinatorium; dasselbe muß die schwierige Bedingung erfüllen, daß die Achse genau durch den Schwerpunkt geht; ist diese Bedingung auch erfüllt, so ist die Beobachtung doch ungenau, weil die Achse auf horizontalen Lagern ruht und daher zu einer Reibung Veranlassung gibt, die einen Theil der Richtkraft aufhebt. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß die Nadel mit dem ganzen Apparat in den magnetischen Meridian gedreht werden muß; man stellt zu dem Zwecke den Apparat so auf, daß die Nadel sich vertical stellt, und dreht ihn dann um 90°, so ist er im magnetischen Meridian.

Beweis. Ist R die Größe der erdmagnetischen Intensität und i die Inclination, so ist die horizontale Componente $Q = R \cos i$ und die verticale $P = R \sin i$, woraus $\tang i = P : Q$. Ist nun die Nadel nicht im magnetischen Meridian, sodern in einer anderen verticalen Ebene, die mit dem Mer. den W. α einschließt, so sind die beiden Componenten in dieser Ebene gleich den Projectionen der Meridiancomponenten; die verticale bleibt dieselbe, $P' = R \sin i$, weil sie der anderen verticalen Ebene parallel ist, die horizontale aber ist $Q = R \cos i \cos \alpha$; daher ist jetzt der Neigungswinkel i' gegeben durch die

Gleichung $\tang i' = P' : Q' = R \sin i : R \cos i \cos \alpha = \tang i : \cos \alpha$. Hieraus ist ersichtlich, daß i' mit α wächst; ist $\alpha = 90$, so ist $\tang i' = \tang i : 0 = \infty$, also ist $i' = 90$. Die Inclinationsnadel macht also den kleinsten Winkel mit dem Horizont, wenn sie sich im magn. Mer. dreht; die Inclination ist der kleinste Neigungswinkel, und der größte findet in einer zum Meridian senkrechten Verticalebene statt.

Fig. 238.



Das gewöhnliche Inclinatorium besteht aus einer längeren Nadel, die mit einer wagrechten Achse auf wagrechten Lagern genau im Mittelpunkte eines verticalen getheilten Kreises ruht, der mit seinem Gestelle sich um den Mittelpunkt eines horizontalen getheilten Kreises drehen läßt, welcher auf einem Dreifuße ruht. Lloyd (1842) und Lamont (1854) haben andere Methoden eingeschlagen, wobei der letztere sein Reisetheodolith benutzt.

Die Inclination ist wie die Declination zu gleicher Zeit an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten an einem Orte verschieden. Es gibt ebenfalls Orte gleicher Inclination; isoclinische Linien sind solche, welche Orte gleicher Inclination verbinden (s. Fig. 238). Wie die isogonischen Linien ungefähr den Zug der Meridiane haben, so laufen die isoclinischen ungefähr wie die Parallelkreise. Die Inclination ist auf der nördlichen Halbkugel nördlich, d. h. der Nordpol ist nach unten gewendet, auf der südlichen Halbkugel südlich. Sie beträgt auf den beiden Magnetpolen der Erde 90° und nimmt von beiden nach dem Aequator zu ab; in der Gegend des Aequators ist die Inclination = Null, die Nadel steht wagrecht. Die Isocline, welche die Orte der Inclination Null verbindet, heißt magnetischer Aequator; derselbe schneidet den geographischen Aequator zweimal und entfernt sich bis 20° von demselben. Die Inclination hat ebenfalls säculare, jährliche und tägliche Variationen, sowie auch Perturbationen.

Auf unserer Karte ist der magn. Aeq., die Linie 0, etwas stärker gezeichnet, und der Nordpol, um den sich die Isocline von 85° herumzieht, als weißer Fleck erkennbar. Die Incl. war zu Paris 1661 = 75°, 1758 = 72°, 1805 = 69°, 1851 = 68°; sie ist also in der Abnahme begriffen; diese Abnahme wird aber nicht wie bei der Decl. größer, sondern kleiner; nach Lamont beträgt die Abnahme in München jetzt durchschnittlich 2,3 Minuten jährlich. Doch gibt es auch Gegenden, wo die Incl. zunimmt, z. B. von 1820—30 am Cap. Näheres über jährliche und tägliche Variationen kennen wir noch nicht. Die Variationen wurden überhaupt erst 1722 von dem berühmten Uhrmacher Graham entdeckt.

461 Die Intensität des Erdmagnetismus wird aus der horizontalen Richtkraft der Erde gefunden, indem man dieselbe durch den Cosinus des Neigungswinkels dividirt; denn die Intensität wirkt in der Richtung, in welche sich eine vollkommen frei aufgehängte Magnetnadel stellt, also in der Richtung der Inclinationsnadel. Da diese mit dem Horizont den Winkel i bildet, so ist die horizontale Componente der Intensität $P = R \cos i$, woraus $R = P : \cos i$. Die horizontale Richtkraft zu bestimmen, dazu dient die Formel $P = \pi^2 k : t^2$ und das Gauß'sche Magnetometer (455.). Doch gibt diese Methode bei genauerem Verfahren das Mittel einer längeren Zeit an einem Orte. Um aber augenblickliche Aenderungen der horizontalen Richtkraft zu beobachten, dient das Bifilarmagnetometer von Gauß (1836). Werden an verschiedenen Orten nach der Gauß'schen Methode die Intensitäten bestimmt, so ist dadurch die genaueste Vergleichung möglich; eine einfachere aber weniger genaue Methode (von Alexander von Humboldt auf seiner amerikanischen Reise angewendet) benutzt den Satz (456.), daß die horizontalen Richtkräfte sich wie die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten. Man läßt eine und dieselbe Nadel an verschiedenen Orten durch den Erdmagnetismus schwingen, dann ist $P : P_1 = n^2 : n_1{}^2$ und daher $R : R_1 = n^2 \cos i_1 : n_1{}^2 \cos i$.

Das Bifilarmagnetometer besteht aus einem Magnetstabe, der in einem Schiffchen liegt, das von 2 langen von der Decke herabhängenden Drähten getragen wird, und zwar in einer zur Declinationsnadel senkrechten Richtung, so daß die kleinste Aenderung der Intensität eine Drehung des Stabes erzeugt, die mit Fernrohr und Spiegel wie bei dem Unifilarmagnetometer beobachtet wird.

Die magnetische Kraft der Erde ist nach Gauß gleich derjenigen von 8464 Trillionen einpfündiger Magnetstäbe; sie ist am kleinsten ungefähr am magnetischen Aequator und wächst, wenn man sich von demselben entfernt; die isodynamischen Linien, d. s. Linien, welche Orte gleicher Intensität verbinden, haben ungefähr denselben Verlauf wie die isoclinischen Linien. Doch fallen die Punkte größter Intensität nicht mit den Polen zusammen; auf der nördlichen Halbkugel gibt es 2 Maximalpunkte, einen in Nordamerika und einen in Nordasien; die Intensität ist in diesen ungefähr doppelt so groß als am Aequator. Auch die Intensität hat Variationen.

462 Aufg. 705. Zu zeigen, daß nach allen Richtungen durcheinander liegende Molekularmagnete keine magnetische Wirkung haben können. — A. 706. Die anziehende Wirkung ungleichnamiger und die abstoßende gleichnamiger Pole durch die gleich gerichteten Mole-

kularmagnete zu erklären. — A. 707. Die Wirkung des einfachen Striches mit einem Nordpole auf die Molekularmagnete darzustellen. — A. 708. Die Wirkung des getrennten Striches für den vorangehenden Südpol. — A. 709. Die Wirkung des Doppelstriches mit dem Nordpole. — A. 710. Die Wirkung des Kreisstriches mit dem Südpole. — A. 711. Den Einfluß der Erschütterung bei der Magnetisirung und auf einen Magnet zu erklären. — A. 712. Torsion und Magnetisirung zu vergleichen, und hieraus einige Wiedemann'sche Sätze zu folgern. — A. 713. Den Einfluß der Wärme aus der Lockerung der Molekularmagnete zu entwickeln. — A. 714. Welche Stellungen nimmt eine Declinations-Nadel an, wenn sie um einen Pol herumgeführt wird? — A. 715. Warum verliert ein unbeschäftigter Magnet an Tragkraft? — Antw.: Molekularanziehung und Molekularmagnete. — A. 716. Die magnetische Kraft zwischen den Polen eines Hufeisens zu erklären. — A. 717. Wenn man einen Hufeisenmagnet in Eisenpulver taucht, so bildet sich eine Brücke, die an einem Ende angezündet, ganz durchbrennt und eine compacte magnetische Masse wird; warum? — A. 718. Wie groß ist nach Häckers Formel die Tragkraft eines Magnetes von 1^{kg}? Aufl.: $T = 10{,}33 \sqrt[3]{1^2} = 10{,}33^{kg}$ — A. 719. Wie groß ist nach Häckers Formel das Gewicht des Magnetes, der sein eigenes Gewicht tragen kann? Aufl.; $P = a^3 = 1104^{kg}$. — A. 720. Wie groß ist die Richtkraft einer Nadel, die unter dem Winkel α gegen ihre Declinationslage gerichtet ist, wenn dieselbe in der senkrechten Richtung $= P$ ist? Aufl.: $P \sin \alpha$. — A. 721. Wie groß ist diese Richtkraft unter 30°? Aufl.: $^1/_2$ P. — A. 722. Wie verhalten sich die Intensitäten des Erdmagnetismus an 2 Orten, an welchen dieselbe Nadel in 1 Min. 70 und 80 Schw. macht? Aufl.: 49 : 64. — A. 723. Wie viel Schw. macht eine Nadel am Maximalpunkte, wenn sie am magn. Aequator 50 per Min. macht? Aufl.: 200. — A. 724. Wie findet man die magnetische Declination mit einem Inclinatorium? Aufl.: Durch das Minimum der Neigung gegen den Horizont. — A. 725. Läßt man eine Inclinationsnadel zuerst im magn. Mer. und dann in der dazu senkrechten Ebene schwingen, so kann man aus den Schwingungszahlen n und n_1 die Inclination berechnen; wie? Aufl.: In dem Mer. wirkt die volle Kraft R, in der senkr. Ebene nur die vert. Componente $= R \sin i$; hieraus folgt $\sin i = n^2 : n_1{}^2$. — A. 726. Sei die Schwingungszahl per Min. im Meridian = 15, in der senkr. Ebene = 14; wie groß ist die Incl.? Aufl.: 87,1°.

Neunte Abtheilung.

Die Elektricität.

1. Die Reibungs-Elektricität.

Elektrische Grunderscheinungen. (Gilbert, de magnete 1600). Wenn man einen Glasstab mit einem Kautschuklappen oder einen Harzstab mit einem Pelzlappen reibt, so erlangen die Stäbe wie die Lappen die Eigenschaft, leichte Körperchen anzuziehen und nach der Berührung wieder abzustoßen, sowie gegen den genäherten Finger knisternde, stechende Funken auszustoßen. Körper, welche diese Eigenschaft haben, werden elektrische genannt, und die uns in ihrem Wesen unbekannte Kraft, welche diese Körper besitzen, nennt man Elektricität. **463**

Schon den alten Griechen war die Eigenschaft des Anziehens und Abstoßens am geriebenen Bernstein (ἤλεκτρον, electron) bekannt, woher sich die Namen erklären. Die einfachsten Versuche lassen sich schon mit einer Siegellackstange, die man mit einem wollenen Lappen reibt, und den Hartkautschukfedergriffen, die man mit einem Taschentuche reibt, machen; doch gelingt die Abstoßung seltener, aus einem später klar werdenden Grunde. Leichter gelingt es mit Kügelchen von Hollundermark oder Kork, welche unter einem Glasstabe lebhaft auf- und abtanzen, wenn man denselben mit Kautschuk reibt oder mit einem Lederlappen, auf den man mittels Talg etwas Zinn-Zink-Amalgam gestrichen hat. Das Knistern und Funkensprühen bemerkt man häufig schon beim Reiben, besonders einer großen Glasröhre mit einem Katzenfelle. — Gilbert zeigte zuerst, daß durch Reiben noch eine große Zahl von Körpern elektrisch wird, die er elektrische, idioelektrische nannte, während es ihm mit Metallen u. a. Körpern nicht gelang, die er deßhalb unelektrische oder anelektrische Körper nannte.

464 **Die elektrische Mittheilung.** Das elektrische Pendel besteht aus einem Kügelchen von Hollundermark, das mittels eines Seidenfadens an einem Glasgestelle aufgehängt ist. Nähert man demselben eine geriebene Glas- oder Harzstange, so wird das Kügelchen zuerst angezogen, berührt die Glasstange und springt dann lebhaft ab. Da das Kügelchen vor der Berührung angezogen, nach der Berührung abgestoßen wird, so muß durch die Berührung etwas mit demselben vorgegangen sein. Zu näherer Prüfung nähern wir ihm ein zweites, kleineres, ebenfalls an einem Seidenfaden hängendes Kügelchen und finden, daß dieses zweite Kügelchen von dem ersten zuerst angezogen und nach der Berührung abgestoßen wird. Das erste Kügelchen ist demnach durch Berührung mit dem Stabe elektrisch geworden. Die Elektricität kann durch Berührung einem anderen Körper mitgetheilt werden.

Hieraus erklärt sich die Erscheinung, daß das erste Kügelchen nicht mehr abgestoßen, sondern wieder angezogen wird, wenn wir es mit der Hand anfassen; es hat durch unsere Berührung seine El. verloren; weiter erklärt es sich, daß das berührte Kügelchen auch allmälig immer weniger und endlich gar nicht mehr abgestoßen, sondern wieder angezogen wird; es kehrt in der Luft allmälig in seinen früheren Zustand zurück, es wird unel., weil es an die ringsum liegende Luft seine El. verliert. Benutzt man bei dem el. Pendel einen Metall- oder Leinenfaden, der an einem Metallgestelle hängt, so wird das Kügelchen zwar angezogen, aber trotz Berührung stets abgestoßen; es verliert seine El. an die es berührenden Körper. — Es wird sich später ergeben, daß die el. Mittheilung eine Wirkung der Influenz ist.

Von einem Körper, der durch Reibung oder Mittheilung oder andere Vorgänge elektrisch geworden ist, sagt man, er sei mit Elektricität geladen; hat er die El. durch Berührung oder andere Vorgänge wieder verloren, so sagt man, er sei entladen.

465 **Gute und schlechte Leiter** (Gray 1727). Hängt man an das elektrische Pendel ein zweites Pendel an einem Metallfaden oder Leinenfaden und theilt dem ersten Kügelchen Elektricität mit durch Berührung mit einem geriebenen Glasstabe, so wird auch das zweite Kügelchen von diesem Stabe abgestoßen, es zieht ebenfalls ein drittes kleineres Kügelchen an und stößt es dann ab. Die Elektricität geht also durch Metall und Leinen. Hängt aber das zweite Pendel an einem Seidenfaden, Glasfaden oder Haar, so wird das zweite Kügelchen von der Glasstange immer angezogen, wie ein gewöhnlicher Körper, es zieht nie ein drittes Kügelchen an. Die Elektricität geht also nicht durch Seide, Glas, Haare. Die Körper zerfallen hinsichtlich der Fortpflanzung der Elektricität in Leiter und Nichtleiter, oder besser in gute und schlechte Leiter, da es absolute Nichtleiter nicht gibt. Die schlechten Leiter nennt man Isolatoren, weil ein Körper seine Elektricität behält, wenn er von lauter schlechten Leitern umgeben ist; einen Körper elektrisch isoliren heißt, ihn mit schlechten Leitern umgeben; die guten Leiter nennt man auch Conductoren. Nach Wiedemann und Franz (1853) ist die Leitungsfähigkeit der Metalle für Elektricität dieselbe wie für Wärme, jedoch findet nach Arndtsen (1858), sowie nach Matthießen und Bose eine scharf ausgeprägte Veränderlichkeit des el. Leitungsvermögens mit der Temperatur statt, und zwar für die weitaus meisten Metalle in nicht sehr verschiedenem Grade, indem die Leitungsfähigkeit von 0 bis 100° durchschnittlich um 30% abnimmt. Analoges wurde für die Wärmeleitung nicht beobachtet.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen guten und schlechtern Leitern ist folgender: Theilt man einem guten Leiter Elektricität mit, so breitet sie sich über der ganzen Oberfläche aus; berührt man einen elektrischen guten Leiter an einer Stelle, so gibt er seine ganze Elektricität ab. Theilt man einem schlechten Leiter durch Berührung Elektricität mit, so bleibt dieselbe an der Berührungsstelle; berührt man einen schlechten elektrischen Leiter, so verliert er seine Elektricität nur an der Berührungsstelle.

Die besten Leiter sind die Metalle (Silber, Kupfer, Gold, Zink, Platin, Eisen, Zinn, Blei, Quecksilber); dann folgen Kohle, Wasser und alle wässerigen Flüssigkeiten und wäs-

serigfeuchten Körper, wie der menschliche, thierische und frische Pflanzenkörper, sowie die feuchte Erde und feuchte Luft. Die besten Nichtleiter sind: Glas, Harz, Seide, Schwefel, trockene Luft, Oele und alle fetten Körper, Alkohol und Aether, Halbleiter sind Steine und trockenes Holz. Glas ist in manchen chemischen Constitutionen (Muschenbroeck 1746) in großer Hitze (Cavendish (1774) und bei großer Dünne (Poggendorff 1868) leitend. Nach Ekman (1870) ist die Nichtleitungsfähigkeit des Glases umgekehrt proportional seinem Gehalte an Natrium; hiermit scheint die Beobachtung von Beetz (1874) zu stimmen, daß Bleiglas besser leitet als Natriumglas. Nach Saïd Effendi (1869) ist, wenn die Leitungsfähigkeit von Wasser = 1000 gesetzt wird, die von Petrol = 72, Schwefelkohlenstoff = 55, Alkohol = 49, Aether = 40, Terpentinöl = 23, Benzol = 16. Feste Nichtleiter werden beim Erhitzen weniger gute Nichtleiter, und wenn sie dem flüssigen Zustande nahe kommen, immer bessere Leiter; umgekehrt ist Eis ein Nichtleiter. Eine interessante Beobachtung hat Sale (1873) am Selen gemacht, daß nämlich das el. Leitungsvermögen durch Sonnenlicht bedeutend erhöht wird, indessen nicht durch die leuchtenden, sondern durch die ultrarothen, wärmenden Strahlen. — Ob die Luftarten außer der Zerstreuung und der Funkenentladung eine eigentliche Leitung besitzen, scheint noch unbestimmt. Nach Hittorf (1874) werden die Gase wenigstens in hohen Temperaturen zu eigentlichen Leitern.

Weil der menschliche Körper ein Leiter ist, die feuchte Erde ebenfalls, und weil die Erde ein unerfüllbares Reservoir für El. ist, so verliert jeder von uns berührte Leiter all seine El., indem sie von dem ganzen Leiter in unsere Hand und in die Erde strömt; daher wird das von uns berührte Kügelchen sofort unelektrisch. — Den Glasstab, den wir zum Zwecke der Elektrisirung reiben, können wir in der Hand halten; denn die an anderen Stellen erregte El. geht nicht an die Berührungsstelle. Würde aber ein Metallstab, den wir so reibend festhalten, durch das Reiben el. werden, so würde seine El. in die Erde gehen. Und das ist auch die Ursache, warum Gilbert die Metalle für unelektrisch hielt und die schlechten Leiter für elektrisch. Gray zeigte schon das Irrige dieser Benennung: er befestigte einen Metallstab an einem Glasstabe und rieb jenen mit einem Katzenfelle, so zeigte er sich ebenso el. wie ein geriebener Harzstab; die anelektrischen Körper waren gute Leiter, verloren also ihre El. durch die Hand; die idioelektrischen Körper waren dagegen nur schlechte Leiter, deren Reibungsel. an der Entstehungsstelle sitzen blieb.

Leiter, die man elektrisiren will, muß man mit schlechten Leitern umgeben, isoliren; die Maschinen zum Elektrisiren haben Füße und Ständer von Glas oder Hartkautschuk; ein Mensch, der elektrisirt werden soll, muß sich auf einen Schemel mit Glasfüßen stellen, auf einen Isolirschemel. Da das Glas indessen leicht eine Wasserhaut anzieht, so gibt man ihm einen Firnißüberzug, und vor dem Gebrauche muß man die Stäbe und Füße durch Erwärmen und Reiben gehörig trocknen.

Wäre die Luft ein guter Leiter, so würde uns wohl die El. ganz unbekannt sein, da jede neu erzeugte El. sofort in die Erde fließen würde; feuchte Luft ist ein schlechter Nichtleiter; daher gelingen viele el. Versuche bei feuchter Luft nicht.

466 **Positive und negative Elektricität** (Du Fay 1733). Ein von der geriebenen Glasstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von dem Gummilappen angezogen, von der Harzstange angezogen, von dem Pelzlappen abgestoßen; die Glasstange hat also dieselbe Wirkung wie der Pelzlappen, aber die entgegengesetzte der Harzstange und des Kautschuklappens. Ein von der Harzstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von dem Pelzlappen angezogen, von der Glasstange angezogen, von dem Kautschuklappen abgestoßen; wieder haben Glas und Pelzlappen dieselbe, Harz und Gummilappen dieselbe, aber der vorigen entgegengesetzte Wirkung. Während also Harz, Kautschuk, Glas und Pelz alle elektrisch sind, sämmtlich leichte Körperchen anziehen und nach der Berührung abstoßen, so haben sie doch eine Verschiedenheit; was Glas und Pelz anziehen, stoßen Harz und Kautschuk ab und umgekehrt; Glas und Pelz verhalten sich aber ganz gleich, ebenso Harz und Kautschuk. Untersucht man alle anderen elektrischen Körper, so verhalten sie sich entweder wie Glas und Pelz, sie stoßen das glasberührte Kügelchen ab und ziehen das harzberührte an; oder sie verhalten sich wie Harz und Kautschuk, sie stoßen entgegengesetzt das harzberührte Kügelchen ab und ziehen das glasberührte an. Hieraus ergeben sich folgende Sätze: 1. Es gibt zwei, aber nur zwei Arten von Elektricität, Glaselektricität und Harzelektricität. 2. Die 2 Elektricitäten haben entgegengesetzte Wirkungen; was die eine anzieht, stößt die andere ab; Franklin (1747) nannte

sie daher positive und negative Elektricität. 3. Durch Reiben entstehen immer beide Arten von Elektricität, im Reiber, Glas und Harz, die eine, im Reibzeug, Kautschuk und Pelz die andere, im ersten Reiber und zweiten Reibzeug die positive, im zweiten Reiber und ersten Reibzeug die negative.

Positiv und negativ sind nicht wie häufig in der Mathematik zu verstehen, nicht so, daß das Negative einen Mangel an dem ausdrückt, was positiv ist, wie es z. B. bei der Wärme und Kälte der Fall wäre, wenn man die erste positive, die zweite negative Wärme nennen würde. Vielmehr ist die neg. El. ebensowohl El. als die pos., und die beiden Ausdrücke bedeuten nur, daß sie in einem Gegensatze zu einander stehen und sich wie entgegengesetzte Größen ganz oder theilweise aufheben, was erst später erhellen wird. Diese jetzt von allen Physikern angenommene Ansicht rührt von Symmer (1759) her. Franklin und Aepinus hatten eine andere Ansicht aufgestellt; sie faßten die pos. El. als eine Vermehrung, die neg. als eine Verminderung einer Elektricitätsart auf; doch führt diese Ansicht zu unmöglichen Annahmen. Die Anhänger der ersten Ansicht werden Dualisten genannt, die der zweiten Unitarier; die Physiker sind meist Dualisten.

Welche Körper durch Reiben positiv und welche negativ werden, hängt von ihrem materiellen Unterschiede, oft auch von der Beschaffenheit der Oberfläche ab; man könnte daher an der Art der El. zweifelhaft werden; die bestimmteste Entscheidung gibt trockenes, reines Glas, das mit amalgamirtem Leder gerieben wird; das Glas wird dann immer positiv, das Leder negativ. Ebenso entschieden wird nach Hagenbach (1873) gewöhnliches trockenes Papier mit Schießwolle gerieben positiv, während nach Poggendorff Pyroxilinpapier zwischen den Fingern durchgezogen ebenso entschieden negativ wird. Young (1807), Faraday (1843) und Hagenbach (1873) haben die Elektricitätserreger in eine sogenannte Spannungsreihe geordnet, in welcher jeder vorhergehende Körper durch Reibung mit allen folgenden positiv, und jeder nachfolgende durch Reibung mit allen vorhergehenden neg. el. wird. Faradays Reihe ist: Katzen- und Bärenfell, Flanell, Elfenbein, Federkiele, Bergkrystall, Flintglas, Baumwolle, Leinwand, weiße Seide, die Hand, Holz, Lack, Eisen und andere Metalle, Schwefel. Youngs Reihe stimmt nur im Allgemeinen mit dieser überein, aber nicht im Einzelnen, woraus schon ersichtlich ist, daß andere Einflüsse, Oberfläche, Temperatur, Art des Reibens bedeutend mitwirken. Frische Glasflächen werden durch Reiben viel schwächer el. als alte, viel gebrauchte; diese werden mit Raubthierpelzen und einigen Krystallen neg., mit allen übrigen Körpern pos.; dagegen mattgeschliffenes Glas wird auch mit Wolle, Federn, Holz, Papier und der Hand neg.; Glas der Länge nach mit Haaren gerieben oder gepeitscht, wird negativ, der Quere nach pos.; selbst ganz gleichartige Körper werden durch Reiben entgegengesetzt elektrisch. Dunkle Seide wird durch Reiben an heller neg., letztere pos.; Pyroxylin und dessen Papier werden fast immer neg., nur durch Reiben am ersteren wird das letztere pos., ebenso das erstere durch Reiben an Messing. Das Messing wird also durch Reiben an Schießwolle neg., die meisten anderen Metalle dagegen pos.; ebenso wird Eisen durch Leder pos.; so sind isolirte Maschinenrollen stark pos. und die Riemen neg.; Menschenhaare werden mit Katzenpelz pos., mit Schießwolle neg. (Hagenbach 1873). Gummibälle werden selbst bei feuchter Luft durch leichtes Reiben stark negativ.

Nicht blos Reiben, sondern auch andere mechanische Operationen erregen El.; Späne vom Feilen, Schaben u. dgl. sind elektrisch; zerschnittener Kork, gespaltene Glimmer- und Gypsplättchen, zerbrochene Siegellackstangen zeigen El.; Mineralien, wie Doppelspath, Arragonit, Flußspath, Bergkrystall werden durch Druck zwischen den Fingern, mehrfach zusammengelegter Wachstaffet durch Zusammenpressen elektrisch. Viele Krystalle, wie z. B. Turmalin, werden durch Erwärmen polarisch, d. i. am einen Ende pos., am anderen Ende neg. el.; die Polarität ist beim Erkalten umgekehrt wie beim Erwärmen. Die Flammen von Wasserstoff, Alkohol, Wachs, Aether, Oel und Fett sind el.; doch sind die Flammen oder wenigstens der aus ihnen entwickelte Dampfstrom auch gute Leiter, so daß man einen el. Stab einfach dadurch unel. machen kann, daß man ihn über eine Spiritusflamme herführt.

467 **Grundgesetze der Elektricität** (Du Fay 1733). Berührt man zwei an Seidenfäden hängende Hollundermarkkügelchen mit der geriebenen Glasstange, so stoßen sie einander ab. 2. Berührt man die zwei Kügelchen mit der geriebenen Harzstange, so stoßen sie einander ab. 3. Berührt man das eine Kügelchen mit der Glasstange, das andere mit der Harzstange, so ziehen sie einander an; berühren sie sich, so findet nach der Berührung weder Anziehung noch Abstoßung statt, beide Kügelchen sind unelektrisch, obwohl sie jetzt beide Elektricität gemischt

enthalten. 4. Ein mit der Glasstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, aber von der Harzstange angezogen, und ist nach der Berührung mit dieser wieder unelektrisch. 5. Ein mit der Harzstange berührtes Kügelchen wird von dieser abgestoßen, von der Glasstange aber angezogen, und ist nach der Berührung mit dieser unelektrisch. Daraus ergeben sich folgende Grundgesetze:

1. Gleichnamige Elektricitäten stoßen einander ab. 2. Ungleichnamige Elektricitäten ziehen einander an. 3. Ungleichnamige Elektricitäten in einem Körper neutralisiren einander.

Die Neutralisation findet nur dann statt, wenn die El. gleich stark sind; ist die eine stärker als die andere, so bleibt von jener ein Theil übrig; ist z. B. in dem Versuche 4. die berührte Stelle der Harzstange stärker el. als das Kügelchen, so verhält sich dieses nicht unel., sondern wird nach der Berührung abgestoßen, aber schwächer, als wenn es unel. die Stange berührt hätte.

Zur Erkennung dieser wichtigen Grundgesetze lassen sich noch mehr Versuche machen. An einem ungedrehten Seidenfaden hängt eine hölzerne Hülse, in die man einen geriebenen Glasstab legt; derselbe wird von einem anderen geriebenen Glasstabe abgestoßen, von der Harzstange angezogen. Zwei an Fäden hängende, sich berührende Collodiumballons entfernen sich weit von einander, wenn man sie mit der Hand reibt.

Man benützt die Gesetze zur Prüfung, ob und wie ein Körper el. ist; ein Körper ist pos. el., wenn er das mit der Glasstange berührte Kügelchen abstößt, oder wenn er von der Glasstange abgestoßen wird; ein Körper ist neg. el., wenn er das mit der Harzstange berührte Kügelchen abstößt, oder wenn er von der Harzstange abgestoßen wird; ein Körper ist unel., wenn er unberührte Kügelchen weder anzieht noch abstößt, oder wenn er sowohl das glasberührte als auch das harzberührte Kügelchen anzieht. Auch hier ist die Anziehung nicht entscheidend aus später erhellenden Gründen. Man benutzt zu diesen Prüfungen häufig ein Prüfungsscheibchen, besonders wenn man der zu prüfenden Stelle das el. Pendel nicht nähern kann; Coulombs (1788) Prüfungsscheibchen besteht aus einer Scheibe von Rauschgold an einem Schellackstäbchen; die zu prüfende Stelle wird mit dem Scheibchen berührt und gibt diesem ihre El. ab; dieses nähert man dann dem el. Pendel. Genauer geschieht die Erkennung der El. durch das Elektroskop. Dasselbe besteht aus 2 neben einander hängenden el. Pendeln, die an einem isolirten Metallstabe befestigt sind, der ihnen die El. zuführt und gewöhnlich oben mit einem Knopfe endigt; zum Schutze vor Luftzug u. s. w. sind die Pendel in ein Glasgehäuse eingeschlossen. Bei Franklins Elektroskop waren die Pendel 2 Leinenfäden, Canton spannte dieselben durch Korkkügelchen. Saussure nahm 2 Silberdrähte mit Kügelchen von Hollundermark, Volta ersetzte dieselben durch 2 Strohhalmschnitte und Bennet durch schmale Streifen von Blattgold; Carl nimmt 2 Aluminiumdrähte mit Hollunderkugeln. Berührt man den Metallknopf mit einem el. Körper, so geht die El. auf beide Pendel über, und diese stoßen einander ab; hierdurch kann man nicht blos erkennen, daß der Körper el. ist, sondern man hat auch ein allerdings sehr ungenaues Urtheil über die Stärke der El. an der Größe der Pendeldivergenz; deßhalb sind manche Elektroskope mit Gradbögen versehen und gelten dann als (sehr ungenaue) Elektrometer. Die Art der El. erkennt man folgendermaßen: man berührt den Knopf mit der geriebenen Glasstange und dann mit dem zu prüfenden Körper oder dem Prüfungsscheibchen; gehen die Pendel noch weiter aus einander, so ist der Körper pos., gehen sie zusammen, so ist er neg. Man kann demnach das Elektroskop auch zum Nachweise der Grundgesetze 1. und 3. benutzen. Statt den Knopf des Elektroskops zu berühren, kann man auch durch blose Annäherung wirken; diese Wirkung ist aber von der angeführten sehr verschieden und kann erst später erklärt werden.

Die Größe der elektrischen Anziehung und Abstoßung (Coulomb 1785). **468** Wenn zwei materielle Punkte el. sind, so ziehen sie sich an oder stoßen sich ab, proportional dem Producte der auf beiden vorhandenen Elektricitätsmengen und umgekehrt proportional dem Quadrat ihres Abstandes. Dieses Gesetz wurde mittels Coulombs el. Drehwage aufgefunden.

Coulombs el. Drehwage war wie die magnetische eingerichtet; nur mußten alle Elemente viel empfindlicher sein, weil die hier verwendbaren el. Kräfte sehr klein sind; der Faden muß sehr fein und leicht, der Wagebalken ein dünnes Schellackstäbchen oder ein mit Schellack überzogener Glasfaden sein, der an einem Ende ein vergoldetes Kügelchen von Hollundermark und am anderen Ende ein kreisförmiges Glimmerblättchen als Gegengewicht trägt. Der Deckel hat zwei seitliche Durchbohrungen, die eine zur Einführung einer der Wagbalkenkugel ganz gleichen Standkugel, welche jene im ungedrehten Fadenzustande

berührte. Die andere zur Einführung der El. mittels eines Probescheibchens oder einer ähnlich construirten Prüfungskugel, mittels deren die Standkugel einen Augenblick berührt wurde. Die Balkenkugel wurde bei einem von Coulombs Versuchen um 36° abgestoßen; dann wurde oben am Torsionsknopfe so lange rückwärts gedreht, bis die Ablenkung nur noch 18° betrug, wozu eine Drehung von 126° nöthig war; die Abstoßung hielt dann dieser Torsion und der noch bestehenden Ablenkung von 18°, also einer Torsion von 144° das Gleichgewicht, während sie in der doppelten Entfernung von 36° nur der Torsion von 36° das Gleichgewicht hielt, womit der zweite Theil des obigen Gesetzes bewiesen war. Coulomb hat es in ähnlicher Art auch für die Anziehung, sowie auch nach der Methode der Schwingungen nachgewiesen. — Leicht ist der Nachweis des ersten Theiles des Gesetzes: man elektrisire die 2 Kugeln wie vorhin und verwinde dann den Draht rückwärts, so daß die Ablenkung des Stabes 30° betrage; die hierzu nöthige Torsion sei 120°, so ist die Abstoßung gleich der Torsion von 150°. Dann bringe man durch das zweite Loch eine ganz gleiche unel. Kugel mit der Standkugel in Berührung, so verbreitet sich die El. auf beide Kugeln in ganz gleicher Menge, und die Standkugel hat nur noch die Hälfte ihrer El.; die bewegliche Kugel nähert sich dann mehr der festen; um sie auf die alte Stellung zu bringen, muß man die Torsion nach rückwärts vermindern; dieselbe beträgt dann nur noch 45°; folglich ist jetzt die Abstoßung gleich einer Torsion von 75°. Da die Entfernung in beiden Fällen dieselbe, und da die Abstoßungen sich wie 150 : 75, die Elektricitätsmengen wie 1 : 1/2 verhalten, so verhalten sich die Abstoßungen wie die Elektricitätsmengen, womit der erste Theil des Gesetzes dargethan ist.

469 **Elektrische Maßbestimmungen.** Als absolutes Maß der El. hat Weber (1846) diejenige Menge von El. vorgeschlagen, welche auf einer kleinen Kugel vertheilt eine andere ebensolche und mit derselben Elektricitätsmenge gleicher Art versehene Kugel, deren Mittelpunkt von dem Mittelpunkte der ersten 1^{mm} entfernt ist, mit einer Kraft abstößt, welche der Masse von 1^{mg} in 1 Sec. die Geschwindigkeit von 1^{mm} ertheilt. Diese der Einheit des Magnetismus analoge Einheit der El. wird bis jetzt nur selten angewendet, da man fast immer nur el. Wirkungen vergleicht und den Zusammenhang zwischen El. und mechanischer Arbeit noch gar nicht kennt. Rieß hat als Einheit die El. vorgeschlagen, welche durch eine bestimmte Reibungsgröße an einem bestimmten Glasstabe entsteht, und zur Vergleichung der el. Quantität daran erinnert, daß bei der Ausbreitung der El. auf einer 2=, 3=, 4mal größeren Fläche die El. jedes gleichen Theiles 2=, 3=, 4mal kleiner wird. Die Menge von El. auf der Flächeneinheit, also die ganze Elektricitätsmenge dividirt durch den Flächeninhalt nennt man die Dichte der El. Zur ungefähren Vergleichung der Elektricitätsmengen dienen Henleys Quadrantelektrometer (1774), Behrens' (1806) und Bohnenbergers Säulenelektrometer (1815), welche auch zur Erkennung geringer Elektricitätsmengen geeignet sind; zur genaueren Vergleichung und absoluten Maßbestimmung dienen Coulombs Drehwage, besonders in der verbesserten Form von Dellmann (1842) und Kohlrausch (1847), sowie Kohlrauschs Sinuselektrometer (1853).

Henleys Quadrantelektrometer besteht aus einem Metallstabe, der einen getheilten Halbkreis trägt, um dessen Mittelpunkt sich ein el. Pendel dreht; der Stab wird auf eine Oeffnung des el. Körpers gesetzt, wird dadurch wie auch das Pendel el. und stößt dasselbe ab; die Größe des Erhebungswinkels gibt ein Urtheil über die Stärke der El., besonders im Vergleiche mit der el. Stärke desselben Apparates zu anderer Zeit, oder auch anderer Apparate, auf welche dasselbe Instrument gesetzt wird. — Bohnenbergers Säulenelektrometer macht eine Anwendung von Zambonis Säule, einem Apparat, der später erklärt wird, und dessen beide Enden Jahre lang pos. und neg. el. bleiben; diese Säule befindet sich in einem Glaskasten, und von ihren Enden gehen Drähte aus, die mit kleinen einander gegenüber stehenden Messingscheibchen endigen, welche durch Schrauben von außen mehr oder weniger einander genähert oder von einander entfernt werden können. Zwischen diesen Messingscheiben hängt in einem zweiten auf dem ersten sitzenden Glasgehäuse ein Goldblättchen, das mittels eines Metallstäbchens durch den Hals der Glasglocke an eine Metallkugel oder Platte geht. Wird nun dieser Kugel eine noch so schwache El. mitgetheilt, so geht diese auf das Goldblättchen, wird von der einen Scheibe angezogen und von der anderen abgestoßen, da dieselben entgegengesetzt el. sind, und es entsteht hierdurch eine Bewegung des Blättchens; bewegt sich dasselbe nach dem pos. Scheibchen hin, so war die mitgetheilte El. neg. und umgekehrt. Je nach der Entfernung der Scheibchen

von einander und der Stärke der Bewegung des Blättchens ist auch ein Urtheil über die Stärke der El. möglich. — Will man eine genauere el. Vergleichung mittels Coulombs Drehwage vornehmen, so gibt man der Standkugel und beweglichen Kugel dieselbe Art von El., wodurch dieselben sich von einander entfernen; durch Torsion z. B. von 70° vermindert man die Ablenkung z. B. bis auf 20°, so ist die Abstoßung = 90° Torsion. Nun gibt man der Standkugel die zu prüfende El., so wird die Drehkugel weiter abgestoßen; es seien außer den 70° Torsion noch 180° nöthig, um die Drehkugel wieder auf 20° Ablenkung zurückzubringen, so ist jetzt die Abstoßung = 270° Torsion. Da die Entfernung in beiden Fällen dieselbe ist, so verhalten sich die Abstoßungen nur wie die Elektricitätsmengen, also umgekehrt diese Mengen wie die Abstoßungen, wie 90 : 270, wie 1 : 3. Mit Coulombs Drehwage können nur geringe Mengen verglichen werden; daher ist sie für El. von geringer Dichte nicht brauchbar. — Dellmans Elektrometer besteht aus einer feinen, an einem Coconfaden hängenden Metallnadel, die sich mit ihrer Mitte in den Ausschnitt eines Streifens von Silberblech einsenkt, dessen beide Hälften etwas links und rechts vom Ausschnitte gebogen sind, so daß die Nadel mit ihrer einen Hälfte sich an die eine Seite, mit der anderen an die andere Seite dieses Bügels lehnt. Der Bügel wird von einem Messingdrahte getragen, der isolirt durch die Seite des Glasgehäuses geht und außen mit einem Knopfe oder einer Platte endigt. — Kohlrausch hat dieses Instrument in das feinste Elektrometer umgewandelt. — Kohlrauschs Sinuselektrometer, welches besonders rasche Vergleichungen gestattet, besteht aus einer frei in einem Gehäuse auf einer Spitze schwebenden langen Magnetnadel, welche zu einem Messingbügel in demselben Verhältnisse steht wie die Silbernadel in Dellmanns Instrument. Wird diesem El. mitgetheilt, so wird die Nadel abgestoßen, und da ihr Drehungsmoment $= mP \sin \varphi$, worin φ den Ablenkungswinkel bedeutet, so hat man aus dem Sinus des Ablenkungswinkels ein Urtheil über die Dichte der El.

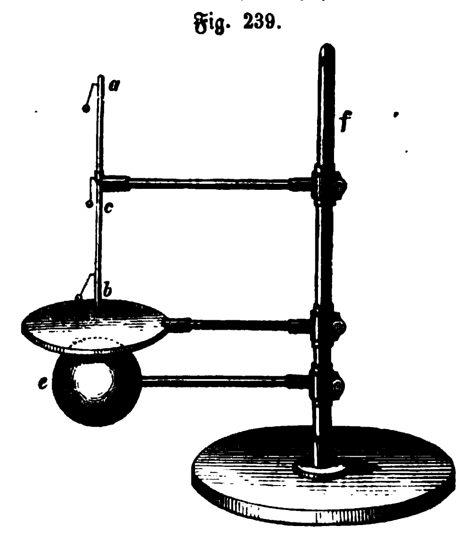
470 **Schwächung des elektrischen Zustandes mit der Zeit** (Coulomb 1785). Selbst die trockenste Luft ist kein absoluter Nichtleiter; die einen el. Körper umgebende Luft wird daher allmälig gleichnamig el., wird dadurch von dem el. Körper abgestoßen und entfernt so einen Theil der El., was sich immerfort wiederholt; diesen Vorgang nennt man Zerstreuung durch die Luft. — Außer der Zerstreuung von El., der Abgabe an die Luft, findet auch noch eine Abgabe von El. an die Isolatoren statt, die den el. Körper tragen oder stützen, der sogenannte Stützenverlust. Diese abgegebene El. bildet auf dem Isolator eine Schicht, deren Dichte mit der Entfernung immer kleiner und endlich gleich Null wird; befinden sich erst jenseits dieses Nullpunktes leitende Körper, so verliert der el. Körper außer dieser Schicht keine El.; ist aber ein solcher Leiter vorhanden, wie z. B. eine Wasser- oder Staubschicht bis zur Verbindung mit der Erde, so findet eine fortdauernde Ausströmung statt; oft ist auch durch eine nicht erkennbare Veränderung der Oberfläche eine solche ableitende Oberflächenschicht entstanden; daher ist ein Schellacküberzug über die Stützen sehr schützend. Sehr gute Dienste leisten die Stützen von Hartgummi, die in letzter Zeit vielfach zur Verwendung kommen, für welche indeß noch Erfahrungen abzuwarten sind.

Nach neueren Untersuchungen von Warburg (1872) ist der Stützenverlust anfangs bedeutend größer als der Luftverlust, nimmt aber bei fortschreitender Ladung der Isolatoren immer mehr ab, und ist in dem endlich eintretenden stationären Zustand bedeutend kleiner als der Luftverlust. Für diese Zerstreuung hat schon Coulomb folgende Formel gegeben: $Q = Q_0 \cdot e^{-\frac{1}{2p} \cdot t}$, worin e die Basis der natürlichen Logarithmen bedeutet, Q_0 die anfängliche El. auf dem Leiter, Q die El. nach der Zeit t, und 2p die Zeit, nach welcher die El. nur noch den eten Theil von Q beträgt. Hierin ist ausgesprochen, daß die Zeit, nach Ablauf derer die Ladung auf einen aliquoten Theil ihrer Größe reducirt ist, einen constanten Werth hat. Diese Gesetze wurden von Warburg bestätigt. Außerdem aber fand derselbe, daß die Zerstreuung in trockenem Kohlendioxyd ungefähr ebenso groß, in Wasserstoff aber nur halb so groß ist, wie in der Luft, daß ferner die Zerstreuung bedeutend mit der Dichte der Luft abnimmt, für pos. und neg. El. nicht verschieden und bei feuchter Luft nicht merklich größer als in trockener Luft ist.

471 **Die elektrische Influenz oder Vertheilung** (Canton 1735, Wilcke 1775, Aepinus 1759). Zur Erklärung der Influenz dient am besten der Vertheilungsapparat von Rieß (die Lehre von der Reibungselektricität von Peter Theophil Rieß 1853, ein klassisches Werk). Der Apparat ist in Fig. 239 abgebildet. Ein cylindrischer Messingstab ab wird vertical von einem Glasarme gehalten, der an einer Metallhülse befestigt, längs dem Glasstabe f bewegt und daran festgehalten werden kann. Eine gleiche Befestigung und Bewegung hat die Glasscheibe d und die hohle Metallkugel e. An dem Messingcylinder befinden sich drei Hollundermarkkugeln an

leinenen Fäden, von welchen die beiden äußersten am Stabe selbst befestigt sind, der mittlere aber an einem Ringsegmente befestigt ist, das höher und tiefer gestellt werden kann. Es befinde sich nun die Kugel und der Cylinder in einer Entfernung von 2°, und der Kugel werde pos. El. mitgetheilt. Diese kann wegen der Entfernung und der Glasscheibe unmöglich auf den Cylinder übergehen; aber dennoch ist dieser el. geworden, was sich dadurch zeigt, daß die Hollunderkugeln jetzt von dem Cylinder abgestoßen werden. Eine einfache Prüfung zeigt, daß die beiden äußersten Pendel entgegengesetzt el. geworden sind und zwar in diesem Falle das untere Pendel bei b neg. und das obere bei a pos.; denn geriebenes Glas stößt das Pendel bei a ab, geriebenes Siegellack das bei b. Hätte man die Kugel mit neg. El. versehen, so wäre das untere Pendel pos., das obere neg. geworden.

Fig. 239.



Da die Kugel von dem Vertheilungscylinder durch Nichtleiter, Luft und Glas, getrennt ist, so kann die El. des Cylinders nicht durch Mittheilung entstanden sein; dies folgt auch daraus, daß die El. der Kugel durch den Versuch und durch Wiederholungen desselben keine Schwächung erfährt; auch würde bei der Mittheilung das der Kugel zugewandte Ende des Cylinders wie das abgewandte dieselbe El. erhalten, wie sie die Kugel enthält, während in unserem Versuche das zugewandte Ende die entgegengesetzte El. besitzt. Der Cylinder ist also el. geworden, ohne El. zu erhalten, und zwar sind auf ihm beide El. entstanden. Hieraus folgt, daß dieselben schon vor dem Versuche in dem Cylinder vorhanden waren. Weil wir sie aber vor dem Versuche nicht wahrnehmen konnten, so mußten sie an allen Stellen in gleicher Menge vorhanden sein und dadurch nach außen eben so stark anziehend als abstoßend wirken und sich so einander aufheben. Da diese Erscheinungen in allen Körpern hervorgerufen werden können, so folgt daraus, daß in allen Körpern immer beide El. in gleicher Menge vorhanden sind und sich gegenseitig neutralisiren. Diese wichtige Folgerung steht auch im Einklange mit dem dritten Grundgesetze, nach welchem gleiche Mengen pos. und neg. El. in einem Körper sich aufheben. Hiernach erklärt sich die Wirkung an dem Apparat in folgender Weise: Der Cylinder enthält pos. und neg. El. an jeder Stelle in gleicher Menge; durch die pos. Kugel wird nach den zwei ersten Grundgesetzen neg. El. in das zugewandte Ende des Cylinders gezogen und pos. El. in das abgewandte Ende desselben gestoßen. Diese Einwirkung eines el. Körpers auf einen unel. nennt man **Vertheilung** oder **Influenz**. Die Gesetze der Influenz sind demnach:

472 1. **In jedem unelektrischen Körper sind beide Elektricitäten an jeder Stelle in gleicher Menge vorhanden und neutralisiren einander.**

2. **Nähert man einem unelektrischen Körper einen elektrischen Körper, so zieht dieser ungleichnamige Elektricität desselben in das zugewandte Ende desselben und stößt gleichnamige Elektricität in das abgewandte Ende.**

Beide El., die angezogene wie die abgestoßene wirken wie gewöhnliche El., nur kann die angezogene nicht fortströmen; man nannte sie daher **gebundene**

und die abgestoßene freie El.; da aber mit dem Ausdrucke gebunden sich leicht die irrige Vorstellung verknüpft, daß die El. nicht mehr ihre sonstigen Eigenschaften habe, oder daß sie wie in einem unel. Körper neutralisirt sei, so wendet Rieß diese Ausdrücke nicht an, er nennt Influenzelektricität erster Art die von dem erregenden Körper angezogene und Influenzelektricität zweiter Art die von dem erregenden Körper abgestoßene El.

Die beiden El. verschwinden für uns, wenn man die erregende Kugel entfernt oder durch leitende Verbindung mit der Erde entladet; hierin liegt auch noch ein Beweis für die Richtigkeit obiger Erklärung; denn dieses Verschwinden kann nur dadurch geschehen, daß gleiche Mengen von El. sich mischen, also müssen dieselben auch schon vor dem Versuche in gleicher Menge gemischt gewesen sein. Indessen kann man die El. auch vor dem Verschwinden schützen und sie demnach erhalten. 1. Statt eines Vertheilungscylinders nimmt man zwei sich berührende Vertheilungskugeln, setzt sie der Influenz aus, und entfernt sie sodann von einander und von der influenzirenden Kugel; in der zugewandt gewesenen Kugel ist dann die Influenzel. erster Art, in der abgewandt gewesenen die Influenzel. zweiter Art. 2. Man verbindet den Vertheilungskörper leitend mit der Erde, indem man ihn z. B. mit der Hand berührt; dann geht die abgestoßene El., die nach der Erde zu vollkommen freie Beweglichkeit hat, ja durch Abstoßung noch stärker nach derselben hinbewegt wird, fort in die Erde, und es bleibt nur die angezogene El. übrig, allerdings noch nicht vollkommen frei, sondern durch die Anziehung an ihre Stelle gebunden; sie ist aber frei, sowie man den erregenden Körper entfernt oder ableitend berührt. Wir haben demnach jetzt eine dritte Methode der Elektrisirung, außer der Reibung und Mittheilung noch die Vertheilung oder Influenz.

Die Vertheilung unterscheidet sich von der Mittheilung dadurch, daß der vertheilende Körper seine El. behält, der mittheilende Körper sie aber theilweise verliert, daß bei der Mittheilung der erregte Körper nur dieselbe El. erhält, wie der erregende, bei der Vertheilung aber beide El., und endlich daß die Mittheilung nur durch einen Leiter geschieht, die Vertheilung aber gewöhnlich durch einen Nichtleiter hindurch. Indessen findet die Influenz auch durch Leiter hindurch statt; nur wird hierbei dieser Leiter ebenfalls influenzirt und die in ihm hervorgerufenen El. wirken verändernd auf den erregten Körper. Umgekehrt ist der influenzirte Körper gewöhnlich ein Leiter; aber es findet doch auch eine Influenz auf Nichtleiter statt. Bringt man ein Schellackstäbchen ganz nahe, oder, da hier von Mittheilung doch nicht die Rede sein kann, in Berührung mit einer el. Kugel, so ist das Stäbchen nach der Berührung entgegengesetzt el., nach Rieß deßhalb, weil die abgestoßene gleichnamige El. sich wegen dieser Abstoßung stärker in der Luft zerstreut, als die angezogene gebundene Influenzel. erster Art, und weil demnach das Schellackstäbchen diese letztere nach der Berührung in größerer freier Menge enthalten muß.

Nach Rieß (1873) findet sogar eine Influenz eines Nichtleiters auf sich selbst statt. Wird die obere Fläche einer wagrechten Platte elektrisirt, so findet sich auf der unteren Fläche eine Schicht gleichnamiger und unmittelbar über derselben eine Schicht ungleichnamiger El.; die gleichnamige strömt, so lange die obere Fläche geladen bleibt, leuchtend aus der unteren Fläche hinaus; wird jene aber entladen, so strömt die ungleichnamige El. leuchtend aus. Hierdurch erklären sich ältere Erscheinungen. Poggendorff stellte (1854) zwei einseitig mit Stanniol belegte Glasplatten mit den unbelegten Glasflächen einander parallel und beobachtete zwischen denselben ein lebhaftes Funkenspiel, als er die 2 belegten Flächen stark entgegengesetzt elektrisirte. Siemens steckte (1858) eine innen belegte Glasröhre in eine außen belegte und erhielt in dem unbelegten Zwischenraum viel Ozon, als die belegten Stellen fortwährend stark entgegengesetzt elektrisirt wurden. Brodie ersetzte (1872) die Belege durch leitende Flüssigkeiten und beobachtete dann in jenem Zwischenraume entweder ein Spiel kleiner Funken oder einen continuirlichen Lichtschein (éffluve électrique), der nach Thénard andere chemische Wirkungen als die Funkenentladung besitzt. An der Holtz'schen Elektrisirmaschine mit zwei rotirenden Scheiben erscheint zwischen denselben den Metallkämmen gegenüber ein hell flackerndes Licht (Rieß 1867). Eine luftleere Glasröhre, am einen Ende mit der Hand gehalten, am anderen Ende einen geladenen Conductor berührend, gibt einen wallenden Lichtstrom pos. El.; ergreift man hiernach das andere Ende, so entsteht der verschwundene Lichtstrom wieder, weil jetzt die neg. El. ausfließt (s. Dielektricität 489.).

Die zwei Influenzel. stimmen ganz mit der gewöhnlichen El. überein; sie wirken abstoßend wie diese, was schon aus der Abstoßung der kleinen Pendel hervorgeht; sie wirken anziehend, was man daraus ersehen kann, daß man neutrale oder entgegengesetzte Pendel in die Nähe des zugewandten oder abgewandten Theiles bringt. Sie wirken aber auch vertheilend; daß die Influenzel. zweiter Art vertheilend wirkt, kann man einfach an einem 2., 3. Vertheilungscylinder sehen, die man in einer Linie horizontal hinter einander dem abgewandten Ende des ersten, in diesem Falle auch horizontal aufgestellten Vertheilungscylinders nähert; es ist dann immer das zugewandte Ende der folgenden Cylinder ungleichnamig, das abgewandte gleichnamig el. mit dem abgewandten Theile des ersten Cylinders. Aus Versuchen von Faraday (1839) und Fechner (1841) folgt aber auch die influenzirende Wirkung der angezogenen, gebundenen Influenzel. erster Art. Legt man auf einen el. Schellackcylinder leitend mit der Erde verbundene Kugeln, so werden dieselben entgegengesetzt el.; legt man sie aber in die Mitte einer über den Schellackcylinder gelegten Scheibe, die man durch Heben oder Senken mehr oder weniger von dieser entfernen kann, so sind in einer gewissen Entfernung die Kugeln trotz ableitender Berührung unel.; denn wegen der Ableitung bleibt nur die Influenzel. erster Art übrig; diese ist in der Scheibe und in den Kugeln, soweit sie vom Schellack herrührt, pos.; da nun diese pos. El. in den Kugeln aufgehoben ist, so muß die pos. Influenzel. erster Art in der Scheibe influenzirend auf die Kugeln gewirkt und diesen dadurch neg. El. gegeben haben. Es läßt sich auch leicht angeben, wie die Erscheinung sich ändern wird, wenn man die Kugeln in andere Entfernungen von der Scheibe bringt, und wenn man voraussetzt, daß die Influenzel. erster Art influenzirend wirkt; und da Fechner die Erscheinungen ganz so gefunden hat, wie sie dieser Voraussetzung entsprechen, so ist damit nochmals die Richtigkeit der Voraussetzung gezeigt, daß selbst die sogenannte gebundene El. influenzirend wirkt. Der einzige Unterschied zwischen den beiden Influenzel. und der gewöhnlichen besteht demnach nur darin, daß die Influenzel. erster Art nicht fortströmen kann, und daß im Gegensatze hierzu die Influenzel. zweiter Art ein um so größeres Fortströmungsvermögen hat, da sie von dem erregenden Körper fortgestoßen wird.

Vertheilungsapparate gibt es noch mancherlei; vor Rieß benutzte man allgemein einen längeren Metallcylinder, der wagrecht auf Glasfüßen ruhte und an verschiedenen Stellen Pendelpaare trug; durch die Divergenz derselben erkannte man die Influenz eines genäherten el. Körpers; auch ist an der Größe der Divergenz zu erkennen, daß die erregte El. von den Enden des Cylinders nach der Mitte zu abnimmt, und zwar, wie Coulomb nachwies, im umgekehrten Verhältnisse steht zu dem Quadrat der Entfernung. Hieraus folgt, daß eine Stelle an dem Vertheilungskörper existiren muß, wo die zwei El. in gleicher Dichte vorhanden sind und sich daher neutralisiren; diese Indifferenzzone liegt etwas von der Mitte ab nach dem influenzirenden Körper hin; sie kommt der Mitte um so näher, je weiter derselbe entfernt ist (Fechner 1841). Die Menge der Influenzelektricitäten ist proportional der Elektricitätsmenge des influenzirenden Körpers; auf einer Scheibe ist sie auch umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung; bei anderen Körpern wirken Form, Dimensionen und Lage auf dieses Gesetz verändernd ein (Coulomb 1788).

Die Influenz spielt bei allen el. Erscheinungen und Apparaten, die wir noch zu betrachten haben, die Hauptrolle, und gibt selbst die Erklärung von mehreren früher angeführten Erscheinungen.

473 **Erklärung el. Erscheinungen durch die Influenz.** 1. Die Anziehung neutraler Körper durch einen el. Körper. Die El. des letzteren wirkt vertheilend auf die beiden einander aufhebenden El. des ersteren, die ungleichnamige wird in das zugewandte Ende gezogen, die gleichnamige in das abgewandte Ende gestoßen. Ist nun der Abstand der beiden Körper klein, so ist der el. Körper dem zugewandten Ende merklich näher als dem abgewandten, die Anziehung überwiegt und die Körper nähern sich. Kleine Körperchen werden leichter angezogen, wenn sie auf einer ableitenden Unterlage ruhen, weil dann die gleichnamige El. abfließt. Ein Schellackkügelchen wird nicht angezogen, weil die Vertheilung in demselben nur schwer stattfindet. Leicht bewegliche, angezogene Körper stellen sich mit ihrer längeren Richtung nach dem el. Körper hin, weil so die Entfernung der beiden Influenzel. am größten ist. Ebenso erklärt es sich, daß leichte und leicht bewegliche, nicht zu schwach el. Körper von unel. angezogen werden. 2. Die Mittheilung der El. Ein einem el. Körper genäherter Leiter erhält an dem zugewandten Ende die entgegengesetzte und an dem abgewandten Ende die gleiche El.; kommen nun die beiden Körper zur Berührung, so gleicht die entgegengesetzte El. einen gleichen Betrag der El. des ersten Körpers aus, es verschwindet scheinbar dieser Betrag der El. desselben, während derselbe Betrag auf dem genäherten Körper übrig bleibt und so auf denselben übergegangen zu sein scheint. Ist ein Körper stärker el. als ein anderer, so muß in Betracht gezogen werden, daß jeder Körper außer seiner freien El. noch einen neutralisirten

Betrag beider El. enthält. Auf diesen neutralen Betrag des schwächeren Körpers wirkt der stärkere Körper auch stärker influenzirend ein, so daß ein größerer Betrag der gleichnamigen El. schließlich auf demselben zurückbleibt. Bei der Mittheilung ist also die scheinbar mitgetheilte El. schon vorher auf demselben Körper gewesen, und die wirklich mitgetheilte El. ist auf demselben durch Neutralisation verschwunden. 3. Die Anziehung gleichnamiger Körper. Ist ein Körper sehr stark und ein anderer schwach gleichnamig el., so kann es in gewissen Entfernungen vorkommen, daß die von dem ersten Körper angezogene ungleichnamige El. die gleichnamige an Stärke übertrifft, dieselbe neutralisirt und in freiem Ueberschusse vorhanden ist, wodurch dann Anziehung stattfindet. 4. Auch bei der Entstehung der Reibungsel. wirkt das erste Influenzgesetz mit, daß in jedem unel. Körper beide El. in gleicher Menge vorhanden sind; die Reibung hat auf allerdings unbekannte Weise den Erfolg, diese El. zu vertheilen und in dem einen Körper die positive, in dem anderen die negative zu sammeln. 5. Wirkung der Vertheilung in Elektroskopen. Weil bei der Annäherung eines el. Körpers an ein Elektroskop auch eine Influenz stattfinden muß, welche die Wirkung der Mittheilung stören kann, so benutzen manche Physiker vorwiegend die Influenzwirkung. Man nähert dem Knopfe oder der Platte des Elektroskops einen el. Körper, während man die Platte berührt; dadurch geht die gleichnamige El. fort in die Erde, und die ungleichnamige bleibt in der Platte gebunden zurück, kann nicht auf die elektroskopischen Blättchen wirken, weßhalb diese unbewegt beisammen bleiben; entfernt man aber Finger und Körper, so geht diese ungleichnamige El. auf die Blättchen über und bringt dieselben zur Divergenz. — Bringt man nun einen Körper näher, der dieselbe El. besitzt wie die elektroskopischen Blättchen, so wird die Divergenz vergrößert, weil die freie noch im Knopfe befindliche gleichnamige El. zu den Blättchen hinabgestoßen und auch durch Vertheilung noch gleichnamige El. hinabgetrieben wird. Nähert man aber einen Körper mit entgegengesetzter El., so zieht dieser die El. aus den Blättchen herauf, die Divergenz wird kleiner; außerdem treibt er durch Influenz ungleichnamige El. hinab, die Divergenz wird aufgehoben, die Blättchen fallen zusammen; bei weiterer Annäherung steigt die gleichnamige El. der Blättchen über die frühere ungleichnamige und die Blättchen gehen wieder aus einander. Hieraus ist die Erkennung eines el. Körpers ohne Berührung möglich.

Die Elektrisirmaschine (Otto von Guericke, geb. 1602, gest. 1680) dient gewöhnlich zur Ansammlung einer größereren Menge einer Art von El.; diese Ansammlung geschieht in einem kugelförmigen oder cylinderförmigen und mit Halbkugeln endigenden Gefäße von Messingblech, das auf Glasfüßen ruht und Conductor genannt wird; die El. wird meistens erzeugt durch Reibung einer drehbaren, kreisförmigen Glasscheibe, des Reibers, an mit Amalgam bestrichenen und durch Federn gegen die Scheibe angedrückten Reibkissen, Reibzeug genannt. Demnach enthält eine Elektrisirmaschine drei Haupttheile: den Reiber, das Reibzeug und den Conductor. Von dem Conductor geht eine Metall-Leitung bis zu beiden Seitenflächen des Reibers und endigt diesen gegegenüber mit Metallspitzen, den sogenannten Einsaugern. Durch die Reibung wird der Reiber pos. el.; diese pos. El. zieht mittels der Saugspitzen neg. El. aus dem Conductor, neutralisirt dieselbe und wird von ihr neutralisirt und läßt einen gleichen Betrag pos. El. auf demselben zurück. Durch den continuirlichen Fortgang dieses Vorganges häuft sich die pos. El. auf dem Conductor immer mehr an; doch ist der Ansammlung eine Grenze gesetzt, indem der Conductor auf seiner ganzen Fläche immer mehr El. in der Luft zerstreut, je dichter dieselbe wird; ist die Menge der zerstreuten El. gleich der Menge der durch den Reiber entwickelten El., so ist die Steigerung der el. Dichte zu Ende. 474

Die jetzt gebräuchlichste Construction der Elektrisirmaschine ist von Winter in Wien; dieselbe enthält einen kugelförmigen Conductor, der nahezu am einen Rande der Scheibe, den Reibkissen gegenüber auf einem Glasfuße steht, und mit welchem 2 Holzringe verbunden sind. In diesen Ringen sind mit Stanniol bekleidete Rinnen ausgegraben, aus welchen sich die kreisförmige Reihe von metallenen Saugspitzen erhebt, welche so durch eine Verlängerung des Stanniolstreifens bis an das metallene Verbindungsstück der Holzringe mit dem Conductor in leitender Verbindung mit demselben sind. In dem Conductor steckt ein Holzstab mit einem großen Holzringe, der einen Draht einschließt. Die Reibkissen werden von einem gabeligen Gestelle getragen, das auf einem Glasfuße befestigt ist und einen kleineren Conductor zur Ansammlung der neg. El. trägt; die Reibkissen sind Bretter mit einem amalgamirten Leder- oder Seidenüberzug; dieser setzt sich in kreisförmige

Streifen von Wachstaffet fort, welche demnach die Scheibe zwischen dem Reibzeug und dem Einsauger isolirend bedecken und sie so gegen die Zerstreuung in die Luft schützen. Der Conductor hat noch eine oder zwei Oeffnungen zum Ansetzen von kleineren Kugeln oder Knöpfen. Auch steht gewöhnlich auf dem gemeinschaftlichen Fußgestelle verschiebbar ein Funkenzieher, bestehend aus einem Metallstabe mit Knopf, von einer Glassäule getragen, und durch eine übersponnene Kette mit dem neg. Conductor in Verbindung zu setzen. Der Reiber, die Glasscheibe ist zwischen zwei runden Holzstöcken verschraubt, die eine längere, gläserne Achse tragen, welche in 2 Lagern durch eine Kurbel umgedreht wird. Will man pos. El. sammeln, so muß man den neg. Conductor ableitend mit der Erde durch eine Kette verbinden und umgekehrt. Das Amalgam von Kienmayer, bestehend aus 2 Th. Quecksilber, 1 Th. Zinn und 1 Th. Zink, wird gepulvert und mittels Fett auf das Leder gestrichen.

Armstrong entdeckte (1840), daß der aus einem Dampfkessel ausströmende Dampf pos., der Kessel selbst neg. el. werde, und daß diese El. durch die Reibung des Dampfes entstehe; Faraday (1844) zeigte, daß dies nur mit feuchtem, Wassertheilchen fortführendem Dampfe geschehe. Armstrong construirte hiernach seine Hydroelektrisirmaschine.

475 **Versuche mit der Elektrisirmaschine.** 1. Die elektrische Anziehung und Abstoßung zeigen:

a. Der Korkkugeltanz; ein Glasgefäß mit metallenem Boden und Deckel enthält Korkkugeln, wird auf den leitenden Boden gesetzt, und durch eine Metallstange wird der Deckel mit dem Conductor verbunden; dann tanzen die Kugeln auf und ab. Der Leser versuche selbst die Erklärung. Aehnlich ist der Puppentanz, der el. Regen und andere Spielereien. b. Das el. Glockenspiel. Eine Glasstange trägt einen wagrechten Messingstab und an diesem eine Glocke mittels eines Metalldrahtes und zwei Glocken mittels seidener Schnüre; von diesen zwei Glocken gehen leitende Ketten zum Boden herab, und zwischen den Glocken hängen an Seidenfäden kleine Klöpfel, die sich hin- und herbewegen, wenn der Messingstab mit dem Cond. verbunden wird; der Leser erkläre die Erscheinung. c. Der el. Büschel; auf einem leitenden Stäbchen sitzt eine Scheibe mit Papierstreifen; wird dieselbe mittels eines Korkes auf den Cond. gesetzt, so gehen die Streifen wie ein Schirm aus einander; ebenso schwillt eine Flaumfeder auf dem Cond. an; ebenso sträuben sich die Haare eines auf einem Isolirschemel oder in Gummischuhen stehenden Menschen, der die Hand auf den geladenen Cond. legt. Das Spinnwebengefühl beim Annähern des Gesichtes oder der hinteren Handfläche an den Cond. d. Der el. Wasserstrahl von A. Fuchs. Verbindet man mit dem geladenen Cond. das Wasser in einem Trichter, der eine sehr dünne Ausflußröhre hat, so wird das ausfließende Wasser ein continuirlicher Strahl, wenn es vorher in Tropfen floß, und es löst sich in Tropfen auf, wenn es continuirlich floß. Ein steigender Wasserstrahl zeigt nach Abendroth (1874) drei el. Erscheinungen bei Annäherung eines el. Körpers: die Attraction, eine Hinneigung des Strahles zu dem Körper, die Contraction, das Aufhören des Perlenregens und der Spritztröpfchen, und die Displosion, das Zerstäuben in seitliche, lang gestreckte, tief liegende Parabeln. Die Contraction findet schon durch schwache, die Attraction und die Displosion durch stärkste genäherte El. statt, Contraction und Displosion auch durch mitgetheilte El. Bei angenäherter El. wird der Strahl ungleichnamig, das Reservoir gleichnamig, wodurch sich die Attraction erklärt. Die Displosion entsteht durch die Abstoßung der gleichnamig el. Theilchen eines Tropfens. Die Contraction erklärt Abendroth durch die Aufhebung der Rotation in den länglichen Tropfen.

476 2. Der elektrische Funke. Nähert man die Hand dem geladenen Cond., so springen knallende und stechende Funken auf dieselbe über; dasselbe zeigt sich beim Annähern eines anderen Leiters; auch jedem anderen Leiter, z. B. dem menschlichen Körper lassen sich Funken entziehen, wenn man denselben isolirt, z. B. auf dem Isolirschemel stehend, mit dem Cond. in leitende Verbindung setzt. Viel zahlreicher sind die Funken, wenn man den Funkenzieher mit dem neg. Cond. verbindet und den Knopf desselben dem Cond. nähert; hieraus geht schon hervor, daß der el. Funke eine Zusammenwirkung der beiden El. ist. Zu näherer Prüfung unterbricht man die Drehung der Maschine, wenn die beiden Cond. geladen und mit el. Pendeln versehen sind, und bringt dann den Knopf des Funkenziehers in die Nähe des pos. Cond.; man findet dann nach dem Ueberspringen des Funkens die beiden Conductoren großentheils entladen, was besonders aus dem Zusammenfallen der el. Pendel folgt. Hieraus muß man schließen, daß mit dem Funken eine

Ausgleichung der beiden El. durch die Luft hindurch verbunden ist; der Funke entsteht, wenn die beiden einander nahe stehenden El. stark genug sind, die schlechte Leitung, den Leitungswiderstand der Luft zu überwinden; der elektrische Funke ist die Vereinigung der beiden Elektricitäten durch die Luft; die hierdurch hervorgerufene Erschütterung der Luft und des Aethers erzeugt das Auftreten von Schall, Wärme und Licht. Die Entstehung des Funkens beim Annähern eines unel. Leiters an einen el. Körper ist hiernach eine Influenzwirkung; die z. B. pos. El. des Conductors zieht in das zugewandte Ende des genäherten Leiters neg. El. und stößt pos. El. in die Erde. Ist die Dichte der so einander gegenüberstehenden El. so groß, daß ihre Anziehung den Widerstand der Luft überwinden kann, so findet die Vereinigung durch die Luft statt. Die Entfernung, in welcher ein Funke überspringt, nennt man die Schlagweite, welche auch gleich der Länge des Funkens ist. Außer der Schlagweite sind noch von Interesse die Gestalt, die Farbe, die Dauer, das Spectrum des Funkens.

Da der el. Funke an jeder Unterbrechungsstelle eines Leiters entsteht, der einerseits mit dem Conductor, anderseits mit der Erde verbunden ist, so lassen sich brillante Erscheinungen mit kleinen Rauten von Stanniol hervorbringen, welche einen solchen Leiter auf Glasflächen bilden, indem ihre Spitzen sich nahezu einander berühren; so entstehen die Erscheinungen der Blitzröhre, der Blitztafel, des leuchtenden Namens u. s. w. — Die Schlagweite ist unter sonst gleichen Umständen der el. Dichte des Cond. proportional; da, wie wir später sehen werden, die el. Dichte mit der Krümmung zunimmt, so erhält man die längsten Funken an einem dünnen Theile des Cond. oder an eingesetzten stark gekrümmten Knöpfen. Eine Winter'sche Maschine mit einer Scheibe von 40″ Durchm. gibt 24″ lange Funken; Winter gibt an, daß die von ihm umgebaute Maschine der polytechnischen Schule zu Wien Funken von 40″ Länge ermöglicht. Die Funkenlänge oder Schlagweite hängt außer der el. Dichte noch ab von der Natur und Dichte der Luft, ist um so größer, je dünner die Luft ist, und für verschiedene Gase verschieden. Hierauf beruht das elektrische Ei, ein elliptisches Glasgefäß, das man luftverdünnt machen kann, und in welchem an den Scheiteln zwei leitend nach außen führende Knöpfe verschoben werden können; hält man den Leitungsdraht des einen Knopfes an den Cond., so entsteht bei jeder Entladung eine prachtvoll violette Funkengarbe, die von einem Knopfe zum anderen geht (das Leuchten des Torricelli'schen Vacuums). Diese Entladungen nähern sich mehr dem Büschellicht und dem Glimmlicht; dasselbe ist bei dem continuirlichen Lichtschein (472.) der Fall. — Die Gestalt des el. Funkens ist an sich die eines leuchtenden Punktes, der den Weg vom Cond. zu dem genäherten Leiter sucht; da der Eindruck vom Anfange dieses Funkenweges noch im Auge haftet, wenn der des Endes schon dazu gekommen ist, so erscheint gleichzeitig die ganze Funkenbahn erleuchtet; ist die El. sehr dicht und der Weg kurz, so ist die Funkenbahn geradlinig; die vom Cond. ausspringenden längeren Funken dagegen haben Zickzackformen, von deren Scheiteln Funkenäste aussprühen; diese Zickzackform erklären Manche dadurch, daß der Funke die Luft vor sich verdichte, diese hierdurch zu einem schlechteren Leiter mache, und seinen Weg durch die nebenliegende dünnere Luft nehme. Außer der gewöhnlichen Funkenentladung unterscheidet man noch das Büschellicht und das Glimmlicht. Das Büschellicht entsteht bei sehr starker Ladung z. B. mit der berühmten starken Maschine von Van Marum, an Stellen von großer el. Dichte, oder auch an dem Ende eines auf den Cond. gesetzten zugespitzten Holzstückes oder abgerundeten Drahtes; das Büschellicht besteht aus einem Kegel violetter Strahlen, der bei einem genäherten Leiter seine Gestalt ändert und sich verlängert; wegen seiner Lichtschwäche ist das Büschellicht nur im Dunkeln sichtbar. Das Glimmlicht oder Spitzenlicht ist ein ruhig auf einer Spitze des Cond. schwebender Stern oder Lichtpunkt. Im verdünnten Raume verwandelt sich Glimmlicht in Büschellicht; dagegen wird ein Büschel zu einem Sterne, wenn man gegen ihn bläst. Hängt man einen dünnen Eisendraht an einen sehr stark geladenen Cond., so wird derselbe bei jeder Entladung im Dunkeln leuchtend und funkensprühend; leichter gelingt der Versuch im luftverdünnten Raume. — Die Dauer des el. Funkens beträgt nach Wheatstone (1834) weniger als eine Milliontel Secunde, so daß alle bewegten Körper, eine schwingende Saite, ein Wasserstrahl, Zeichnungen auf einem rotirenden Kreisel in Ruhe erscheinen, wenn sie nur von dem Funken beleuchtet sind. — Die Farbe und Helligkeit des el. Funkens ist verschieden; am hellsten weiß ist der kurze, geradlinige Funke der el. Flasche; sonst hängt die Farbe von dem Metalle der Leiter ab, zwischen denen der Funke überspringt, so wie von der Beschaffenheit des Gases, durch welches der Funke geht; je dichter das Gas ist, desto mehr nähert sich die Farbe dem Weiß; in ver-

dünnter Luft ist der Funke bläulich weiß, in Stickgas violett, in Wasserstoff hochroth, in Kohlendioxyd grün. Man hält das Leuchten für eine Gluth der Gas- und der mitgerissenen Metalltheilchen; dieses Mitreißen erhellt aus dem allmäligen Rauhwerden einer Funkenstelle, aus dem Ueberziehen einer anderen mit einer dünnen Metallschicht des anderen Leiters u. s. w.

477 3. **Wärmewirkungen.** Die Wärme, welche ein el. Funke enthält, bringt nicht blos die Gas- und Metalltheilchen desselben zum Glühen, sondern kann auch zum Entzünden gebraucht werden. Schwefeläther, warmer Alkohol, Phosphor und Harzstaub in einer metallnen Schale dem Cond. genähert, entzünden sich beim Ueberspringen des Funkens. Füllt man eine kleine Blechröhre mit Knallgas und läßt mittels zweier hineinragenden Drähte einen Funken durch dasselbe springen, so entsteht ein Knall: el. **Pistole.** Hierauf beruht Voltas Eudiometer und die ältere Zündmaschine. Diese Wirkungen sowohl, wie die physiologischen und chemischen, treten stärker bei der el. Flasche auf, werden also dort betrachtet. Von den letzteren sei nur erwähnt die Bildung des Ozons, dessen eigenthümlicher, an Schwefeldioxyd erinnernder Geruch sich bei längerem Arbeiten an einer Elektrisirmaschine allmälig verbreitet und besonders stark an einer auf den Cond. gesetzten Spitze wahrgenommen wird.

478 4. **Sitz der Elektricität.** Die beiden Bestandtheile der neutralen El. mögen wohl auch im Inneren eines Leiters gleichmäßig vertheilt sein; freie El. dagegen findet sich nur auf der Oberfläche der Leiter, weil die einzelnen Theile der el. Kraft sich, wenn sie im Inneren wären, einander so weit fortstoßen würden, bis sie an einer schlechten Leitung einen Widerstand fänden; dies ist aber nur an der Oberfläche eines Leiters der Fall, weil hier der Widerstand der Luft der Fortbewegung eine Grenze setzt; die freie El. findet sich also auf der Oberfläche der Leiter. Versuche von Coulomb (1788) und Faraday (1839) haben diese Folgerung bestätigt.

Coulomb fand, daß die Ladung einer Standkugel seiner Drehwage in derselben Stärke durch eine massive und durch eine Hohlkugel geschwächt wird. — Stellt man eine Metallkugel auf eine isolirende Stütze, umgibt sie sodann mit zwei anschließenden Halbkugeln von Blech, die man an isolirenden Handhaben hält, und elektrisirt das Ganze durch Berührung mit dem Cond., so sind nach dem Abheben der Halbkugeln wohl diese, nicht aber die Kugel el.; ja sogar wenn man zuerst die Kugel elektrisirt und dann die Halbkugeln aufsetzt, zeigen sich nur diese el., die Kugel selbst aber unel.; alle El. ist auf die Halbkugeln übergegangen. — Eine Hohlkugel mit Oeffnungen elektrisirt gibt auf ihrer Außenfläche dem Probescheibchen starke, auf der Innenfläche keine El. — Faraday fertigte eine große Kammer aus Holzstäben mit Drahtnetz überzogen, das mit Papier und dann mit Stanniol bekleidet war; wurde die Kammer von außen noch so stark elektrisirt, so konnte Faraday selbst mit den feinsten Elektroskopen im Inneren keine Spur von El. entdecken. — Faraday elektrisirte ein Drahtnetz (Fig. 240) von der Form eines Schmetterlingsnetzes und fand die Außenfläche mittels des Prüfungsscheibchens stark, die Innenfläche gar nicht el.; stülpte er durch Ziehen an einem Faden, der an den Boden des Netzes befestigt war, dasselbe um, so zeigte sich die jetzige äußere, vorher ganz unel. Innenfläche stark el., die jetzige innere, vorher stark el. Außenfläche dagegen unel. — Magnus hing eine Messingrolle an 2 Fortsätzen an Seidenfäden auf und wickelte um die Rolle ein Metallblatt, das an seinem losen Ende ein Doppelpendel und einen isolirten Handgriff trug; wurde die Rolle elektrisirt, so gingen beim Aufziehen derselben die beiden Pendel stark zusammen, divergirten aber bei dem alsdann erfolgten Zusammenrollen wieder immer mehr.

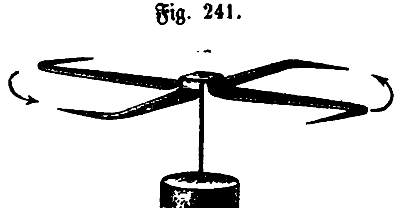
Fig. 240.



5. **Vertheilung der Elektricität auf Leitern; Wirkung der Spitzen** (Coulomb 1787, Poisson 1811, Rieß 1853). In einer ebenen Oberfläche kann die Abstoßung der einzelnen Theilchen der el. Kraft nicht dahin wirken, dieselben aus der Fläche direct hinauszustoßen, weil hierzu eine zur Fläche senkrechte Kraft nothwendig wäre, während doch die Richtung der Abstoßung in die Flächenrichtung selbst fällt; nur nach den Grenzen der Fläche zu kann die El. durch ihre eigene Abstoßung bewegt werden; aus ebenen Flächen tritt also die El. nicht in der Fläche selbst, sondern an den Grenzen derselben; die el. Dichte ist in der Mitte am kleinsten, am Rande am größten. Auf krummen Flächen ist aber durch die Abstoßung einer Anzahl von el. Theilchen auf eines derselben eine gegen das Flächenelement dieses Theilchens gerichtete Resultante vorhanden, welche eine zur Fläche senkrechte Componente enthält und daher dieses Theilchen aus der Fläche hinauszustoßen bestrebt ist; diese Theilchen sind, wie eine einfache Zeichnung erkennen läßt, um so näher an dem betreffenden Theilchen, je stärker die Krümmung ist; ebenso werden andere benachbarte Theilchen von den umliegenden um so mehr zu dem ersten hingestoßen, je stärker die Krümmung ist. Die elektrische Dichte ist also auf krummen Flächen um so größer, je stärker die Krümmung ist. Ist die Krümmung überall dieselbe wie bei einer Kugel, so ist auch die el. Dichte überall dieselbe; an elliptischen und eiförmigen Körpern ist die Dichte an den Scheitelenden am größten; bei einem Cylinder, der mit Halbkugeln endet, ist sie an diesen Halbkugeln am größten. Eine Spitze hat unendlich kleine Krümmungsradien, also ist die el. Dichte und das Ausströmungsvermögen an mathematischen Spitzen unendlich groß, bei den wirklichen Spitzen nur außerordentlich groß; nach einer Spitze hin wird von allen Elementen der Fläche, deren Auslauf die Spitze bildet, die El. hingetrieben. Kanten haben nur nach einer Richtung unendlich kleine Krümmungsradien, nach anderen nicht; folglich ist die Ausströmung zwar stark, aber nicht so groß wie bei den Spitzen.

Coulomb hat die Sätze für Kugeln, Ellipsoide und andere Körper mittels eines Prüfungsscheibchens und der el. Drehwage nachgewiesen; Rieß benutzte gepaarte Prüfungsscheibchen und gab die Zunahme der Dichte genau in Zahlen an. Poisson suchte die ganze Sache mathematisch zu ergründen, indem er den Satz zu Grunde legte, daß die Wirkung der Oberfläche eines Körpers oder einer Anzahl von Körpern auf einen Punkt im Inneren gleich Null sein muß. Aus den angegebenen Sätzen erklärt sich, warum man als Cond. Kugeln oder mit Halbkugeln geschlossene Cylinder anwendet, und warum an ihnen alle Spitzen und Kanten vermieden sein müssen. Setzt man auf den Cond. einer Elektrisirmaschine eine Spitze, so ist es unmöglich, eine Ladung zu Stande zu bringen; alle El. strömt aus der Spitze mit Glimmlicht hinaus; da demnach die umliegende Luft gleichnamig el. wird, so wird sie von der Spitze abgestoßen, es entsteht ein lebhafter Luftstrom, **der el. Wind**, der deutlich sichtbar wird, wenn man eine Kerzenflamme nähert. Verbindet man den Cond. mit einem aufrechten Leiter, auf dessen Spitze leicht drehbar eine S-förmige Platte, an den Enden zugespitzt, schwebt, oder ein Rädchen aus umgebogenen zugespitzten Drähten gebildet, so wird dasselbe durch die Abstoßung zwischen den Spitzen und der abströmenden Luft wie das Segner'sche Wasserrad gedreht: **das el. Flugrad** (Fig. 241). — Bringt man an dem abgewandten Ende eines influenzirten Körpers eine Spitze an, so strömt die Influenzel. zweiter Art aus derselben fort, und die Influenzel. erster Art bleibt zurück; befindet sich aber die Spitze an dem zugewandten Ende, so fließt die Influenzel. erster Art aus derselben, die so elektrisirten Lufttheilchen nähern sich dem influenzirenden Körper, neutralisiren sich und einen Theil von dessen El., während die gleichnamige Influenzel. zweiter Art auf dem influenzirten Körper zurückbleibt. Während demnach auf dem influenzirenden Körper ein Theil seiner El. verschwindet, ist auf dem influenzirten Körper ein ebenso großer Betrag gleichnamiger El.

Fig. 241.



erschienen, die Spitze scheint diese El. eingesaugt und auf den letzteren übergeführt zu haben. Hierin besteht die saugende Wirkung der Spitzen, welche z. B. an der Elektrisirmaschine ein wesentliches Moment bildet. Stellt man einen Apparat, der ein isolirtes Metallstängelchen enthält, das sich oben zu einer seitlichen Spitze krümmt und unten eine Kugel trägt, mit der Spitze nach dem Cond. zu, so springen Funken aus der Kugel auf eine gegenüberstehende Kugel oder auf ein darunter befestigtes Schälchen voll Alkohol und entzünden denselben. Bei der saugenden Wirkung wirkt jedenfalls auch mit, daß der Spitze gegenüber in dem influenzirenden Körper wegen der starken Anziehung der Spitze die Dichte der El. ebenfalls sehr groß, und so das Ausströmen der El. verstärkt wird. Ganz ähnliche Wirkungen wie die Spitzen haben auch glimmende und flammende Körper, weil dieselben ebenfalls und zwar spitzigere Spitzen bilden, als die Körperspitzen sind; um einen nicht leitenden Körper vollkommen unel. zu machen, genügt es, ihn über eine Alkoholflamme hin- und herzuziehen.

Wie die El. aus ebenen Flächen nur schwer hinausgeht, so geht sie auch nur schwierig hinein; berührt daher ein angezogenes Papierschnitzelchen einen Glasstab, so nimmt es dessen El. nur selten an, wird daher auch nur selten abgestoßen, woraus sich das häufige Mißlingen des allerersten Versuches erklärt.

480 6. Unterschiede der beiden El., soweit sie mittels der Elektrisirmaschine erkennbar sind, bestehen nur wenige. Hält man dem neg. Cond. eine Spitze gegenüber, so zeigt sich an dieser ein Büschel, dem pos. gegenüber ein Stern; auch beim Ausströmen aus einer stark geladenen Maschine entsteht am pos. Cond. ein Büschel, am neg. ein Stern. Dem entsprechen die Lichtenberg'schen Figuren (1778). Läßt man einen pos. Funken auf einen Kuchen von Schellack oder Pech überschlagen und bestreut dann denselben mit Bärlappsamen, so entstehen baumartig sich verästelnde Staubfiguren; mit dem neg. Funken entstehen nur rundliche Flecke. Entsprechend halten manche den pos. Funken für mehr schlagend, den neg. für mehr stechend. Nach Bezold (1872) entstehen die Figuren am deutlichsten auf Hartgummiplatten, wenn diesen die El. durch eine Drahtspitze zugeleitet wird. Im Dunkeln sieht man vom Draht, wenn er negativ ist, einen blauen Lichtkegel, dessen Achse der Draht ist, bis an die Platte gehen; wenn aber der Draht pos. ist, so entstehen verästelte Lichtfiguren auf der Platte. Da demnach die Lichtfiguren mit den Staubfiguren stimmen, so hält Bezold die letzteren für die Wirkung der von der El. in Bewegung gesetzten Lufttheilchen; die neg. Figur entstehe durch einen Kegel von Luftströmen, dessen Achse der Draht und dessen Basis die Figur ist, die pos. dagegen durch Lufttheilchen, die auf der Scheibe von außen radial nach dem Punkte hinströmen, nach welchem der Draht gerichtet ist. Die Kundt'schen Figuren (1869) werden auf einer wagrechten, leitenden Platte erzeugt, z. B. auf einer rauhen Zinkplatte; dieser steht eine isolirte Spitze oder Kugel gegenüber. Werden diese und die Platte entgegengesetzt elektrisirt, während die Platte mit feinem Staub z. B. von Bärlapp bestreut ist und wird dann der Staub abgeblasen, so bleiben scharf begrenzte Staubkreise bis zu 10cm Durchm. zurück. Schneebeli (1870) und Röntgen (1874) haben die Größenverhältnisse untersucht: die Durchmesser sind um so größer, je größer die Platte und je dicker die Staubschicht ist; sie wachsen auch mit der Entfernung der Spitze bis zu einem gewissen Maximum, nach dessen Ueberschreitung sie abnehmen. Sie sind größer, wenn die Spitze neg., als wenn sie pos. ist, und bleiben ganz aus, wenn eine Kugel benutzt wird und diese neg. ist; in dünneren Gasen sind sie größer als in dichteren. Röntgen erklärt die Entstehung durch die fortführende Entladung des Conus einer Spitze: von demselben strömten die el. Lufttheilchen senkrecht zur Oberfläche, also innerhalb eines Kegelstumpfes, nach der Platte, gäben dort ihre El. an den Staub ab, so daß derselbe an der entg. El. der Platte in die Lücken der Rauhigkeiten hineingezogen und so festgehalten würde, und zwar innerhalb der kreisförmigen Grundfläche des Kegelstumpfes. Diese fortführende Entladung sei nur möglich, wenn die Abstoßung der Theilchen stark genug sei, die Lufthaut der Spitze zu durchbrechen, und sei daher an einer luftfreien Oberfläche besonders stark; hierdurch erkläre sich das Experiment von Guthrie (1873): ein erhitzter Leiter mit einem el. Körper in Berührung, ja nur in die Nähe gebracht, entladet diesen augenblicklich.

481 **Der Elektrophor** (Wilcke 1762, Volta 1775) besteht aus einem blasenfreien Harzkuchen (aus schwarzem Pech und Kolophonium zu gleichen Theilen gegossen), der in einer metallenen Schüssel, der Form ruht, und von einer mit einem isolirenden Handgriffe versehenen Metallplatte, dem Schilde, bedeckt ist. Der Kuchen wird durch Peitschen mit einem Fuchsschwanze neg. el. Setzt man den Schild auf den gepeitschten Kuchen und hebt ihn ohne Berührung wieder auf, so ist er unel. Berührt man ihn aber vor dem Aufheben, so ist er nachher pos. el. Berührt man

bei aufliegendem Schilde Form und Deckel, so empfindet man eine Zuckung, einen el. Schlag. Der Harzkuchen behält seine El., wenn der Schild aufliegt, Monate lang, eine Eigenschaft, die man die Tenacität des Kuchens nennt.

Diese Erscheinungen sind eine sehr lehrreiche Folge der Influenz. Der neg. Kuchen zieht als Influenzel. erster Art die pos. El. des Schildes in die Unterfläche desselben und hält sie dort fest, stößt aber als Influenzel. zweiter Art die neg. El. des Schildes in dessen obere Fläche. Hebt man den Schild ohne vorherige Berührung mittels des isolirenden Handgriffes auf, so vereinigen sich diese beiden El. wieder, der Schild ist wieder unel. Berührt man aber den Schild vor dem Aufheben, so geht die abgestoßene neg. El. in die Erde, die festgehaltene pos. aber bleibt zurück, einstweilen noch gebunden. Wird nun der Schild gehoben, so wird diese gebundene El. frei, der Schild ist pos. el., gibt Funken, kann zum Laden eines Conductors durch öftere Wiederholung des Vorganges benutzt werden u. s. w., wobei sich die El. des Kuchens durchaus nicht vermindert. Daß diese Erklärung der Haupterscheinung richtig ist, wird durch einen Apparat Wilckes bewiesen, der aus 2 dünnen durch Seidenschnüre verbundenen und getragenen Metallplatten besteht. Legt man diese Vorrichtung als Schild auf den Kuchen und hebt sie dann ohne Berührung, so zeigt sich von den 2 sofort getrennten Platten die obere neg., die untere pos., und beide zusammen, wenn man sie isolirt auf einander legt, unel.; berührt man aber vor dem Aufheben die obere Platte, so ist nach dem Aufheben nur die untere Platte el. und zwar pos. — Die Tenacität des Kuchens hat verschiedene Gründe: die ebene Oberfläche, aus welcher die El. nur schwer hinausgeht; die Abwesenheit von zerstreuend wirkender Luft durch Aufsetzen des Deckels; endlich eine Influenzwirkung der neg. Oberfläche des Kuchens. Die neg. El. des Kuchens zieht aus dem unteren Theile des Kuchens pos. in ihre Nähe bis in die Mittelfläche desselben und stößt neg. El. in die Unterfläche und in die Form. Ist die Form isolirt, so zeigt sie sich neg. el.; ist sie aber nicht isolirt, so geht diese neg. El. in die Erde, und die ganze Unterhälfte des Kuchens wird pos. el., ja sogar die Form auch; diese pos. El. des unteren Kuchentheils hält die neg. des oberen fest und wird von ihr festgehalten. Berührt man aber zuerst die Form und dann den aufliegenden Schild mit Daumen und Finger, so strömt pos. El. von der Form zum Schilde, und neg. vom Schilde zur Form, beides durch die Hand, welche dabei eine Zuckung empfindet; diese entgegengesetzte Bewegung beider El. in einem Leiter wird el. Strom genannt.

482

Die Ansammlungsapparate (Rieß 1853). Mittels der Elektrisirmaschine und des Elektrophors kann man einem Leiter nur bis zu einer gewissen Grenze El. mittheilen; die Grenze ist erreicht, wenn die el. Dichte des Leiters gleich derjenigen des mittheilenden Körpers ist. Die Ansammlungsapparate haben den Zweck, eine größere Menge von El. in einem Leiter, oder gewöhnlich beider El. in zwei von einander isolirten Leitern anzusammeln. Der eine Leiter ist dabei leitend mit der Erde verbunden, der andere ist isolirt und kann durch einen Fortsatz mit dem mittheilenden Körper in Berührung gebracht werden; der erstere heißt Condensator, der letztere Collector; Fig. 242 stellt die Rieß'sche, zu Messungen geeignete Form des Ansammlungsapparates vor; A ist der Collector, B der Condensator, A trägt den Fortsatz C. Wird B um das Gelenke b umgeschlagen und C mit dem Con=

Fig. 242.

ductor einer Elektrisirmaschine verbunden, so erhält der Collector A pos. El. von der Dichte des Conductors. Wird nun die Verbindung mit diesem unterbrochen und B in die parallele Stellung zurückgelenkt, so wird durch Influenz die A zugewandte Vorderfläche von B neg. und die Hinterfläche pos.; geht die pos. El. der Hinterfläche, wie es hier der Fall ist, in die Erde, so wird die Vorderfläche noch stärker el., weil die neutralisirende pos. El. abgeleitet ist. Diese neg. El. der Vorderfläche von B nun hat die hier wesentlichste Wirkung; sie zieht die vorher gleichmäßig durch A und C verbreitete pos. El. des Collectors großentheils in dessen dem Condensator zugewandte Hinterfläche, wodurch die Dichte dieser El. auf der Vorderfläche und in dem Fortsatze stark vermindert wird. Folglich ist auch die Dichte der Fortsatzkugel kleiner als die des Conductors, und wenn demnach diese Kugel den Conductor wieder berührt, so kann abermals pos. El. auf den Collector strömen; da diese in derselben Weise durch Influenz in dem Condensator neg. El. anhäuft, so wird sie von dieser abermals großentheils nach der Hinterfläche des Collectors hingezogen, die el. Dichte der Vorderfläche und des Fortsatzes werden auch jetzt vermindert, und es kann deßhalb wieder vom Conductor pos. El. in den Fortsatz und Collector strömen; diese wirkt wieder durch Influenz auf den Condensator und gibt demselben neg. El. So häuft sich denn die pos. El. im Collector und die neg. im Condensator immer mehr an. Diese Anhäufung geht aber nicht bis ins Unendliche; denn bei jeder neuen Einströmung geht doch nicht alle pos. El. in die Hinterfläche des Collectors, ein Theil bleibt auch in diesem selbst und seinem Fortsatze zurück; folglich vermehrt sich die Dichte der Fortsatzkugel mit jeder Einströmung; ist dieselbe gleich der Dichte des Conductors geworden, so findet keine Einströmung mehr statt, der Ansammlungsapparat ist geladen. Wie groß die Dichtigkeit der pos. El. auf den Collector ist, ergibt sich daraus, daß diese Dichtigkeit zu derjenigen der Fortsatzkugel, also auch des Conductors in demselben Verhältnisse steht, wie bei der ersten Einströmung die Dichte des Collectors zu der des Fortsatzendes. Die Verstärkungszahl des Ansammlungsapparates, d. i. der Quotient der Dichte des Collectors durch die des Conductors ist gleich dem Quotienten der Dichte der Fortsatzkugel vor und nach dem Zurücklenken des Condensators bei der ersten Einströmung. Sie wird also gefunden, indem man die Dichte der Fortsatzkugel vor und nach dem Zurücklenken mißt, und die erste durch die letzte dividirt. Rieß fand, daß die Verstärkungszahl abnimmt, wenn die Entfernung zunimmt, und daß sie bei kleinen Entfernungen diesen umgekehrt proportional ist; von Einfluß ist aber auch die Größe der Scheiben, und zwar ist die Verstärkungszahl für größere Scheiben größer; dann nimmt die Verstärkungszahl auch etwas zu, wenn die Länge der Zuleitung stark abnimmt; ebenso ist sie größer, wenn der Ableitungsdraht des Condensators zu dessen Fläche parallel, als wenn er senkrecht ist; auch ist sie größer, wenn die Zuleitung nach der Mitte des Collectors geschieht, als wenn sie nach dem Rande hin stattfindet; endlich hängt sie von dem Material zwischen den Platten ab, s. Dielektricität (489.).

So fand Rieß, daß bei einer Entfernung der Scheiben von 4,5^{mm} die Dichte am Ende der Zuleitung 0,155 von der anfänglichen Dichte betrug; also war die Verstärkungszahl 1 : 0,155 = 6,4; bei einer Entfernung von 9^{mm} war dieselbe = 1 : 0,274 = 3,6. Der Durchmesser der Scheibe betrug im ersten Falle 184^{mm}; betrug derselbe aber nur 117^{mm}, so war die Verstärkungszahl nur 4,3 gegen 6,4. Die Länge des Zuleitungsdrahtes war bei 6,4 gleich 7,8^{mm}; hatte der Draht aber eine Länge von 225^{mm}, so ergab sich die Verstärkungszahl = 5,8. — In unserer Figur ist der Isolator, welcher den Collector und den Condensator trennt, eine Luftschicht; durch einen starren Isolator wird die Wirkung nicht geschwächt, sondern gestärkt; denn die Zerstreuung durch die Luft fällt weg, die beiden Elektricitäten rücken nach Franklin von den Metallplatten weg auf die äußersten Schichten des Isolators, wodurch sie sich einander näher kommen und dadurch die Verstärkungszahl vergrößern, und endlich kann man bei starrer Zwischenschicht stärker laden als bei luft-

artiger Zwischenschicht, weil die Luft der Vereinigung beider El. in einem Funken einen kleineren Leitungswiderstand entgegenstellt als ein starrer Nichtleiter. Die drei Hauptformen des Ansammlungsapparates sind der Condensator, die el. Flasche und die Franklin'sche Tafel. Unter Condensator wird jedoch nicht die Condensatorplatte des eben betrachteten Ansammlungsapparates, sondern eine andere Vorrichtung, deren Hauptelement allerdings die Condensatorplatte ist, verstanden.

1. Der Condensator (Volta 1783, Kohlrausch 1849) hat den Zweck, El. von sehr geringer Dichte zu verdichten, um sie noch nachweisen, erkennen und messen zu können. Er besteht aus der Condensatorplatte und der Collectorplatte, welche auf der einen Seite mit einer wohl isolirenden Firnißschicht überzogen sind und auf der anderen Seite gläserne Handgriffe tragen; die Condensatorplatte kann von ihrem Handgriffe ab- und auf die Zuleitungsstange eines Elektroskops aufgeschraubt werden. 483

Man bringt den zu prüfenden Körper an die Collectorplatte, während man die Condensatorplatte ableitend mit dem Finger berührt; die Firnißschicht bildet den trennenden Isolator; die Collectorplatte ladet sich mit der gleichnamigen und die Condensatorplatte mit der ungleichnamigen El.; berührt man mit der Collectorplatte den Knopf eines Elektroskops, so erfährt man, ob der Körper El. enthielt. Ist die Condensatorplatte aufgeschraubt, so muß man die Collectorplatte auf dieselbe setzen, mit dem Körper berühren, während die Condensatorplatte ableitend berührt ist; dann hebt man die Collectorplatte ab, und sieht dann an den elektroskopischen Blättchen, ob der Körper el. war oder nicht; in dem letzten Falle erhält das Elektroskop die entgegengesetzte El. des zu untersuchenden Körpers. Soll dies nicht stattfinden, so muß man die obere Platte ableitend berühren und an die untere den zu prüfenden Körper bringen. Will man ein Urtheil über die Art der El. ermöglichen, so genügt es, den geriebenen Glasstab zu nähern; gehen die elektroskopischen Blättchen aus einander, so sind sie pos., gehen sie zusammen, neg. Kohlrausch hat einen Condensator, der Messungen schwacher El. ermöglicht, construirt. Die beiden Messingplatten, an ihren Vorderflächen vergoldet, sind mittels ihrer messingenen Fortsatzstängelchen in Holzträgern befestigt, von denen der eine fest, der andere verschiebbar auf der Bodenplatte des Apparates sitzt; die beiden Platten werden einander genähert, geladen und dann durch Ziehen an einem Faden weit von einander entfernt; da hier die Zuleitung, Ableitung u. s. w. immer dieselbe ist, so ist auch die Verstärkungszahl immer dieselbe; man hat also an der Einwirkung der Collectorplatte auf ein Elektroskop ein Urtheil über die Stärke der El.

2. Die elektrische Flasche (Kleist in Camin 1745, Cuneus in Leyden 1746) dient zur Ansammlung einer größeren Menge von El., als ein Leiter für sich aufnehmen kann. Sie besteht aus einem Glascylinder, der innen und außen bis auf $^2/_3$ seiner Höhe mit Stanniol belegt und an dem übrigen Theile mit Siegellackfirniß bestrichen ist. Das Glas wird mit einem Deckel aus trockenem Holze versehen, durch welchen ein Messingstäbchen geht, das außen einen Knopf und innen Kettchen trägt, die auf dem inneren Belege schleifen. Um die Flasche zu laden, wird der äußere Beleg leitend mit der Erde verbunden, indem man die Flasche z. B. in die Hand nimmt oder auf eine leitende Unterlage stellt, und der Knopf des inneren Beleges wird mit dem Conductor einer Elektrisirmaschine leitend verbunden oder in Berührung gebracht, oder mit dem Schilde des Elektrophors öfter berührt. Der innere Beleg bildet den Collector, das Stäbchen mit dem Knopfe den Fortsatz und der äußere Beleg den Condensator. Die pos. El. des inneren Beleges stößt pos. des äußeren in die Erde, zieht neg. desselben an und hält sie fest und wird von dieser angezogen und festgehalten, so daß die el. Dichte in dem Stängelchen nach oben immer mehr abnimmt und daher in dem Knopfe gering ist; deßhalb wird so lange die Einströmung sich wiederholen, bis die Dichte des Knopfes gleich der des Conductors ist; dann wird aber die Dichte im inneren und äußeren Belege die des Conductors soviel mal übertreffen, als die durch die Dimensionen erzielte Verstärkungszahl angibt. Durch Vergrößerung der Flaschen und Belege kann man die Verstärkungszahl vergrößern; da aber hier eine gewisse Grenze geboten ist, so verbindet man mehrere Flaschen zu der elektrischen Batterie, indem man sie mit ihren äußeren Belegen auf eine gemeinschaftliche lei- 484

tende Unterlage stellt und die Knöpfe der inneren Belege durch Stäbe mit einander oder mit einem gemeinschaftlichen Hauptknopfe verbindet. Eine andere Form dieses Apparates ist die Franklin'sche (1751) Tafel, eine 4eckige in ein Fußgestell gefaßte Glasplatte, welche auf beiden Seiten theilweise mit Stanniol belegt und an den übrigen Theilen gefirnißt ist. Die Batterie und die Tafel werden wie die Flaschen geladen. Eine Entladung findet statt, wenn man den äußeren Beleg mit dem Knopfe des inneren Beleges leitend, durch den sogenannten Schließungsbogen, verbindet; es bewegt sich dann die pos. El. vom inneren Belege zum äußeren und die neg. vom äußeren zum inneren, wodurch ein gleicher Betrag beider neutralisirt wird. Diese entgegengesetzte Bewegung und Vereinigung der beiden El. in einem Leiter nennt man, wie schon erwähnt, einen elektrischen Strom, und wenn derselbe wie bei der el. Flasche eine sehr kurze Dauer hat, gewöhnlich einen elektrischen Schlag. Ist die El. stark genug, so geht der el. Schlag auch durch Nichtleiter, wie z. B. durch die Luft, wobei der elektrische Funke entsteht; der el. Funke ist demnach ein el. Schlag durch die Luft.

In den Schließungsbogen schaltet man Körper verschiedener Art ein und beobachtet dann die verschiedenen Wirkungen der Entladung, des elektrischen Schlages, auf dieselben; man bedient sich hierbei verschiedener Entlader. Henleys allgemeiner Auslader (1760) besteht aus 2 Metallstäben mit Knöpfen und Ringen, die an Gelenken auf Glasfüßen drehbar und verschiebbar sind und dadurch mit ihren Knöpfen einem Tischchen nahe gebracht werden können; in die Ringe werden Drähte eingehängt, die von den Belegen kommen, auf das Tischchen zwischen die Knöpfe werden die Gegenstände gebracht, durch welche der el. Schlag gehen soll. Andere Entlader bestehen aus dreh- oder biegbaren Metallstäben, die mit Knöpfen endigen und mit einem oder 2 Glasstäben, oder an einer Guttaperchahülle gefaßt werden, und deren Knöpfe mit dem inneren und äußeren Belege in Verbindung zu bringen sind.

Die Quantität der Ladung mißt man mittels Lanes Maßflasche (1757). In gleicher Höhe mit dem Knopfe einer Leydener Flasche ist ein verschiebbares und getheiltes Messingstäbchen angebracht, das in der Nähe des Flaschenknopfes ebenfalls einen Knopf und am anderen Ende einen Ring zur Aufnahme eines von dem äußeren Belege herkommenden Drahtes trägt. Der Knopf dieser Maßflasche wird nun mit der äußeren Belegung der zu messenden Flasche verbunden und diese geladen; dann strömt sämmtliche abgestoßene pos. El. dieses äußeren Beleges auf den Knopf der Maßflasche über, ladet diese und erzeugt bei ganz bestimmter Ladung einen Funken zwischen diesem Knopfe und dem des Stäbchens; die Zahl dieser Funken bei einem bestimmten Abstande der 2 Knöpfe gibt ein Urtheil über die Stärke der Ladung der ersten Flasche; diese hat immer wieder dieselbe Ladung, wenn die Maßflasche bei demselben Abstande der Knöpfe dieselbe Funkenzahl gegeben hat.

485 **Wirkungen der Entladung.** 1. Der elektrische Funke. Legt man den einen Knopf eines Entladers an den äußeren Beleg einer Flasche und nähert den anderen dem Knopfe des inneren Beleges, so springt in der Schlagweite ein hell weißleuchtender, geradlinig fortschreitender, stark knallender Funke über, eine Entladung durch die Luft. Die meisten Eigenschaften des Funkens wurden schon früher betrachtet. Die Schlagweite maß Rieß mittels des Funkenmikrometers; dasselbe besteht aus einem fest auf einer Fußplatte mittels einer Glassäule ruhenden Knopfe mit Klemmschraube und einem ebensolchen auf der genau getheilten Fußplatte verschiebbaren Knopfe. Nach Rieß ist zwar die Schlagweite unabhängig von der Natur des Schließungsbogens, nicht aber die Stärke des Funkens. Eine Batterie von 5 Flaschen gab bei einer Schlagweite von $1\frac{1}{2}'''$ durch einen kurzen, dicken Kupferdraht entladen einen hellglänzenden Funken mit schmetterndem Knalle, durch einen langen dünnen Platindraht einen schwachen Funken und bei Einschaltung einer Wasserröhre einen kaum merklichen Funken, während die Schlagweite dieselbe blieb. Die Elektricitätsmenge, welche bei der Schlagweite entladen wird, beträgt nach Rieß immer $^{11}/_{13}$ der ganzen Ladung, so daß $^{2}/_{13}$ derselben übrig bleiben; nähert man daher die Knöpfe auf $^{2}/_{13}$ der Schlagweite, so entsteht ein zweiter schwächerer Funke, durch welchen aber auch wieder nur $^{11}/_{13}$ der Restladung entladen werden, so daß nochmals ein kleiner Rest bleibt, zu dessen Entladung aber die Schlagweite bis zur Berührung verkleinert werden muß; die Entladung zerfällt also in mehrere Partialentladungen. Indessen findet selbst einige Zeit nach dieser Berührung, wenn man sie zuerst aufgehoben und dann wiederhergestellt hat, eine 2te, 3te, ja 4te Entladung statt; demnach ist durch die erste Entladung selbst bei der Berührung nicht alle El. neutralisirt worden; es blieb in der Flasche ein

Rest zurück, der el. Rückstand oder das Residuum. Man erklärt dasselbe gewöhnlich dadurch, daß ein Theil der beiden El. von den Belegen abgestoßen in das Innere des Glases eindringt, und erst nach der primären Entladung, wo diese Abstoßung aufhört, allmälig in die Belegungen zurückkehrt, um dort secundäre Entladungen zu veranlassen. Kohlrausch, der diese Erscheinungen mit Hülfe seines Sinuselektrometers genau studirt hat, spricht sich indessen gegen diese Erklärung aus. Für dieselbe wird der Versuch mit der zerlegbaren Flasche angeführt: diese besteht aus einem Glasgefäße, das in ein Metallgefäß paßt, und in welches sich eine mit einem Knopfe versehene Metallform einschließen läßt. Zusammengesetzt bilden diese Theile eine el. Flasche; wird diese geladen, nach einiger Zeit zerlegt und dann die Metalltheile unel. gemacht, so zeigt sie nach abermaliger Zusammensetzung sich doch nach einiger Zeit wieder schwach geladen. Ganz Gleiches zeigt die zerlegbare Tafel. Jedoch sprechen diese Versuche nicht gegen die Erklärung von Kohlrausch, der die Ursache des el. Rückstandes in der Influenz der beiden Belege auf das Glas sucht (s. Dielektricität, 489.). Nach Versuchen von Wüllner (1874) mögen oft beide Ursachen zusammenwirken, der größte Einfluß scheint aber in der Influenz zu liegen. — Eine Flasche kann auch successive durch zahlreiche Funken entladen werden; die Menge der pos. El. des inneren Beleges ist nämlich offenbar größer als die neg. des äußeren Beleges; stellt man daher die Flasche auf einen Isolirschemel, und entzieht ihr durch Annähern des Fingers auf den Knopf einen pos. Funken, so kann die jetzt verminderte pos. El. nicht mehr alle neg. des äußeren Beleges festhalten, und man kann daher jetzt diesem einen Funken entziehen; dann ist das frühere Uebergewicht des inneren Beleges wieder hergestellt, und es kann ein pos. Funke dem Knopfe entlockt werden u. s. w. — Eine Folge des Ueberschusses auf einer Belegung sind auch die Seitenentladungen; man bemerkt dieselben z. B., wenn man die Flasche durch eine Kette von feinem Draht entladet, deren Glieder Spitzen tragen, wobei diese Spitzen Lichtbüschel sprühen, oder, wenn man von dem Schließungsbogen einen Seitendraht nach einem Elektroskop führt.

486 2. Mechanische Wirkungen. Durch den Funken der Flasche wird die Luft heftig aus einander geschleudert, Pulver wird zu den Seiten zerstreut; geht der Funke durch ein geschlossenes Gefäß, so schleudert der Luftstoß den Kork heraus (der el. Mörser). Kinnersleys Thermometer besteht aus einem Glasgefäße, das mit einer dünnen Röhre communicirt, und in welches von oben und unten mit Kugeln endigende Theile dieses Schließungsbogens hineingehen. Springt der Funke von Kugel zu Kugel, so wird die Luft stark auseinandert geschleudert, drückt auf untenstehende Flüssigkeit und läßt am Steigen derselben in der Röhre die Stärke des Vorganges erkennen. Ein fester Nichtleiter, wie Kartenblätter, Pappendeckel, Glas, wird durchbohrt; das Glas muß aber sorgfältig gereinigt sein; bei durchbohrten Karten und Deckeln sind die Löcherränder nach beiden Seiten aufgeworfen, als ob wirklich die Kraft nach beiden Seiten gerichtet sei. Sind die beiden Enden des Schließungsbogens, zwischen die man ein Kartenblatt faßt, nicht genau gegenüber, so befindet sich die Oeffnung immer an dem neg. Ende (Lullins Versuch). Viel leichter sind auch die Lichtenberg'schen Figuren mit der Flasche zu erzeugen. Bringt man in dem Schließungsbogen einen dünnen Draht an, so erhebt sich bei weniger starker Ladung ein grauer Dampf von losgerissenen Theilchen, von Funken durchsprüht; bei stärkerem Schlage erhält der Draht Einbiegungen, die sich bei wiederholten Schlägen vertiefen und vermehren; bei noch stärkerer Entladung glühen die Drähte, zerreißen und zersplittern in angeschmolzene Stücke, und endlich bei der höchsten Stärke zerstäuben die Drähte unter glänzender Lichterscheinung und mit heftigem Knalle. Ein mit Gold übersponnener, auf eine helle Grundlage gezogener Seidenfaden kann zu braunen Streifen auf der Grundlage zerstäubt werden, ohne den Seidenfaden zu verletzen. Sind die Enden einer Unterbrechungsstelle in einer eingeschlossenenen nichtleitenden Flüssigkeit, so wird dieselbe von einem Funken durchsetzt und das Gefäß oft zerschmettert. Zinnfolie kann in Dunst aufgelöst, Goldschaum zwischen Glasplatten in dieselbe eingeschmolzen werden. Bei vielen dieser Versuche thut Henleys allgemeiner Auslader gute Dienste. Legt man auf das Tischchen desselben Zucker, Schwerspath, Flußspath, und läßt mehrere Funken durch diese Körper schlagen, so leuchten sie nachher im Dunkeln.

487 3. Thermische, physiologische, chemische und magnetische Wirkungen. Durch den el. Funken einer Flasche oder Batterie sind leicht entzündliche Körper eher zum Brennen zu bringen, als mit der Elektrisirmaschine; auch Pulver kann entzündet werden; zu dem Zwecke füllt man es in ein kleines Holzkästchen, in dessen Höhlung von außen Stifte hineinragen; an diese Stifte werden die 2 Theile des Schließuugbogens gebracht; doch muß in denselben ein feuchter Faden eingespannt sein, weil sonst der Funke zu rasch und heftig ist, das Pulver fortschleudert, aber nicht entzündet. Sicherer geht dieser Versuch, wenn die Stiftenden mit Knallquecksilber oder noch besser mit Kaliumchlorat und Schwefelantimon bedeckt sind. Leichter gelingt das Entzünden von Baumwolle mit Collo-

dium bestreut. — Die Erwärmung von Drähten hat Rieß mittels seines el. Luftthermometers studirt; dasselbe besteht aus einer luftgefüllten Glaskugel, durch welche eine beiderseits mit äußeren Klemmschrauben verbundene Platinspirale geht, und welche mit einer geneigten und vorn umgebogenen, Flüssigkeit enthaltenden Röhre in Verbindung steht, die eine Gradeintheilung unter sich hat. In die Klemmschrauben werden die beiden Enden des Schließungsbogens gebracht, der Draht wird von dem durchgehenden Strome erwärmt, die Luft ausgedehnt und dadurch die Flüssigkeit vorangeschoben; die Größe der Verschiebung gibt ein Urtheil über die Stärke der Erwärmung. Ueber den Einfluß der el. Ladung und der Dimensionen des Drahtes fand Rieß, daß die Erwärmung des Drahtes direct proportional ist dem Product der Dichte mit der Quantität der El., aber unabhängig von der Länge des Drahtes und umgekehrt proportional der 4ten Potenz des Radius desselben, daß aber die freiwerdende Wärmemenge direct der Länge und umgekehrt dem Quadrat des Radius proportional ist. Ueber den Einfluß der Entladung beobachtete Rieß, daß die Dauer der Entladung durch den dünnen Draht je nach dessen größerer oder geringerer Leitungsfähigkeit weniger oder mehr verzögert werde, und daß das Erwärmungsvermögen eines Drahtes der verzögernden Kraft des Metalles direct, seiner Dichtigkeit und specifischen Wärme umgekehrt proportional sei. Hieraus leitete Vorßelmann de Heer (1840) den Satz ab, daß die Entladung einer mit derselben El. geladenen Batterie in jedem Schließungsbogen dieselbe Wärmemenge erzeuge; aus diesem Satze und dem Princip von der Erhaltung der Kraft schloß Helmholtz (1846), daß die Entladung eine oscillirende sei. — Faßt man mit der einen Hand den äußeren Beleg und berührt mit der anderen den Knopf, so empfindet man schmerzhafte Zuckungen, bei schwachen Schlägen nur im Handgelenke, bei stärkeren auch im Oberarm, bei sehr starken auch durch die Brust, wobei Blutspeien und Lähmung entstehen kann; man kann den Schlag auch durch bestimmte Körpertheile leiten, indem man sie in den Schließungsbogen einschaltet. Auch eine Anzahl von Personen kann gleichzeitig den Schlag empfinden, wenn sie eine Kette bilden und die erstere den äußeren Beleg faßt, die letzte den Knopf berührt. Mit einer el. Flasche kann man kleine, mit einer Batterie größere Thiere tödten; doch nimmt man nach der Section solcher keine innere Verletzung wahr. Wenn man in der Nähe eines stark mit einer El. geladenen Körpers z. B. eines Conductors steht, ohne denselben oder den entladenden Gegenstand zu berühren, so empfindet man im Moment der Entladung dennoch eine el. Zuckung, die man Rückschlag nennt; derselbe wird dadurch erklärt, daß der el. Cond. auf den nahen menschlichen (oder auch einen anderen) Körper influenzirend wirkt, die ungleichnamige El. in den zugewandten Theil zieht, die gleichnamige in den abgewandten Theil stößt; mit der Entladung ist die Ursache der Influenz verschwunden und es vereinigen sich daher die beiden getrennten El. wieder und erzeugen so die Wirkung des el. Schlages. Der el. Schlag lenkt auch die Magnetnadel ab, zersetzt chemische Verbindungen, erzeugt in benachbarten gewundenen Leitern el. Ströme; doch sind diese Wirkungen bei dem dauernden el. Strome viel bedeutender als bei dem Schlage, der nur ein momentaner, oder wenigstens sehr kurz dauernder el. Strom ist.

488 Dauer der Entladung, Geschwindigkeit der Elektricität (Wheatstone 1835, Feddersen 1860, Watson 1748). Wenn vor einem leuchtenden Punkte ein ebener Spiegel sich dreht, so dreht sich auch das Spiegelbild des Punktes; und zwar doppelt so viel als der Spiegel; ist die Drehung langsam, so kann man die einzelnen Punktbilder unterscheiden; geschieht die Drehung rasch, so schmelzen dieselben wegen der Dauer des Lichteindruckes in eine Linie zusammen. Wie lang diese Linie ist, hängt von der Dauer des Lichtpunktes ab und von der Schnelligkeit der Drehung; je länger der Funke dauert, und je rascher der Spiegel sich dreht, desto länger ist auch die Linie; sie enthält doppelt so viel Bogengrade, als der Spiegel in der Zeit des Funkens zurücklegt; man kann sie daher aus der Geschwindigkeit des Spiegels und der Funkenzeit berechnen. Legt der Spiegel in 1 Sec. n Rotationen zurück, so ist sein Weg in 1 Sec. $= n . 360^0$ und in der Funkenzeit $x = nx . 360$; folglich ist der Weg des Spiegelfunkens $= 2nx . 360$. Beobachtet man nun diesen Weg und findet ihn $= \alpha$, so ist $x = \alpha : 720n$. Als nun Wheatstone einen Spiegel in der Nähe eines el. Funkens einer Elektrisirmaschine umdrehte, zeigte sich erst bei 800 Rotationen in der Secunde eine Verlängerung des Funkenbildes, und diese betrug doch noch weniger als $^1/_2{}^0$; folglich ist die Dauer des Funkens kleiner als $^1/_2 : (720 . 800)$, kleiner als 1 : 1152000 Sec. Größer zeigt sich die Funkendauer der el. Flasche; Wheatstone fand die Dauer des Funkens, der zwischen zwei mit Kugeln versehenen Enden eines metallischen Schließungsbogens übersprang, = 0,000042 Sec. Feddersen fand bei Einschaltung größerer Widerstände noch größere Funkenzeiten, so bei Einschaltung eines 9mm langen Wasserrohres 0,0014, eines 180mm langen Wasserrohres 0,0183 Sec.; auch fand er eine Zunahme der Dauer mit der Schlagweite und der Größe der Batterie; bei noch genaueren Versuchen zeigte sich, daß von einer gewissen Kleinheit der Widerstände

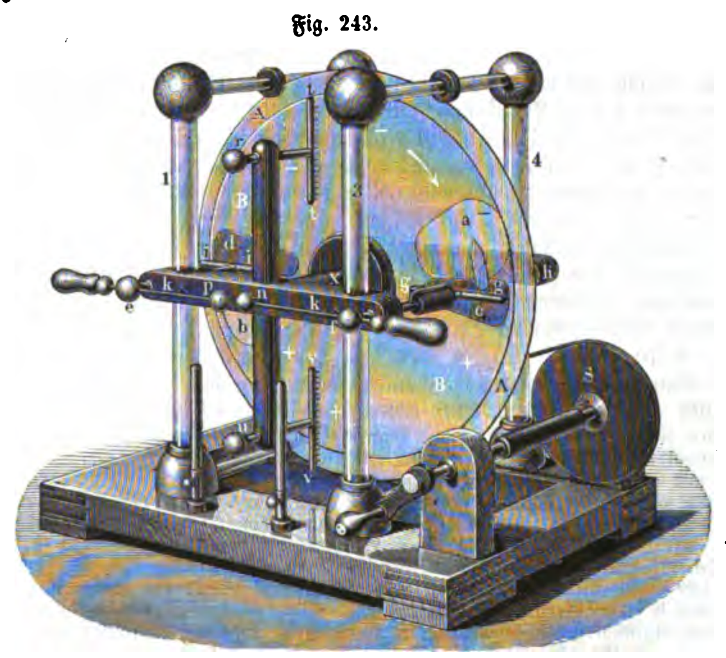
an die Dauer auch zunahm, wenn die Widerstände kleiner wurden. Aus dieser Größe der Flaschenentladungszeit folgt, daß jede Partialentladung wieder aus einer Reihe von Partialentladungen besteht; zuerst entladet sich der Schließungsbogen, was besonders daraus folgt, daß nach der Ladung auch der von der Flasche getrennte Schließungsbogen die Entladung gibt; durch diese erste Entladung wird die Luft zur Seite geschleudert, verdünnt, und daher fähig zur Entladung der vom inneren Belege herbeigeströmten El., und so wiederholen sich immer schwächere Entladungen. Demgemäß löste bei sehr raschen Rotationen in einem verbesserten Apparate Feddersens das Funkenbild sich in eine Reihe von parallelen, immer feiner werdenden und dichter stehenden Linien auf. Hieraus würde sich die Zunahme der Funkendauer bei der Zunahme des Widerstandes wohl erklären; zur Erklärung aber der Zunahme bei sehr kleinen Widerständen nimmt Feddersen an, daß in diesen Fällen die Entladung eine oscillirende, aus entgegengesetzten Entladungen zusammengesetzt sei; bei der ersten Entladung strömten die beiden El. mit einer Art von Trägheit über den Vereinigungspunkt hinaus, kehrten dann wieder um, und brächten so eine entgegengesetzte Entladung hervor, was sich noch öfter wiederhole. Diese Oscillationen könnten aber nur bei kleinen Widerständen auftreten, weil nur dann das Ueberströmen der El. möglich sei. Die Betrachtung des in die Länge gezogenen Funkenbildes auf einer matten Glastafel bestätigte diese Theorie, da dasselbe aus hellen Streifen, durch dunklere Zwischenräume getrennt, bestand; diese oscillirende Entladung wurde von Helmholz (1846) vorausgesagt, sowie auch von Thomson (1853) und Kirchhoff (1857) theoretisch abgeleitet und von Oettingen (1862) dadurch bestätigt, daß er die Rückstände in der Batterie untersuchte und dieselben der Oscillation gemäß bald pos., bald neg. fand, sowie (1873) dadurch, daß er nach jeder primären Entladung die Flasche secundär geladen fand.

Watson beobachtete schon, daß ein in einen 400m langen Schließungsbogen eingeschalteter Mensch den Schlag zu derselben Zeit empfindet, als er den Funken sieht, daß demnach dieser Weg in unmeßbar kleiner Zeit zurückgelegt wird. Mittels der Methode des rotirenden Spiegels gelang es Wheatstone indeß dennoch, die Geschwindigkeit der El. in einem Kupferdrahte zu messen. Von der äußeren Belegung einer Flasche ging ein kurzer Draht mit Kugelende zu dem sogenannten Funkenbrette; ganz nahe bei der ersten Kugel lag eine zweite, von der ein 402m langer Draht in wohl isolirten Windungen zu einer 3ten Kugel ging, die von der 2ten etwas weiter entfernt, aber ganz nahe bei einer 4ten Kugel lag; von dieser ging abermals ein 402m langer Draht zu einer 5ten Kugel, die wieder etwas weiter von der 4ten, aber nahe bei einer 6ten lag, welche das Ende eines kurzen zum Knopfe des inneren Beleges gehenden Drahtes bildete. Die 6 in gerader Linie liegenden Kugeln bildeten in der Verbindung des inneren und äußeren Beleges, in dem Schließungsbogen 3 Unterbrechungsstellen, gaben also bei einer Entladung der Flasche 3 in gerader Linie liegenden Funken; zwischen dem Funken 1—2 bis zu dem Funken 3—4 hatte die El. 402m zurückzulegen, und ebenso von 3—4 bis zu 5—6. Vor dem Funkenbrette wurde nun der rotirende Spiegel aufgestellt; bei einer geringeren Umdrehungszahl sah man immer die 3 in gerader Linie liegenden Funken auch im Spiegel in gerader Linie, woraus folgte, daß in der Zeit, in welcher die El. 402m zurücklegte, die Drehung des Spiegels so gut wie Null war; bei 800 Rotationen in der Secunde aber erschienen die 3 Funkenbilder als gerade, gleich lange Linien, die 2 seitlichen in genau gleicher Höhe, das mittlere gegen die seitlichen etwas verschoben, und zwar bei entgegengesetzter Spiegeldrehung nach entgegengesetzter Richtung. Hieraus folgte, daß die 2 äußeren Funken gleichzeitig entstanden, was wieder für den Ausgang der Elektricitäten von beiden Belegen, für die Gegenströmung im el. Strome spricht; weiter folgte daraus, daß der mittlere Funke später entstand, und zwar um so viel später, als der Spiegel Zeit brauchte zu einer Drehung gleich der halben Verschiebung des mittleren Bildes. Da nun diese Verschiebung $^1/_2{}^0$ betrug, so betrug die Zeit zur Spiegeldrehung $= {}^1/_2 : (2.800.360) = 1 : 1152000$ Sec.; in dieser Zeit hatte die El. den Weg von 402m zurückgelegt; daher legt sie in einer Sec. einen Weg von $402 . 1152000 : 7420 = 62500$ Meilen zurück. Demnach wäre die Geschwindigkeit der El. im Kupferdrahte = 62500 Meilen, die größte Geschwindigkeit, die uns auf Erden bekannt ist. Für die El. im Eisendrahte fand Walker eine Geschw. von nur 4000 M., und Fizeau und Gounelle fanden für Kupfer 24200, für Eisen 13500 M. — Die verschiedenen Resultate rühren nach Faraday (1853) davon her, daß die El. von dem umgebenden Medium eine verschiedene Verzögerung erfährt, indem sie durch Influenz dieses Medium mit entgegengesetzter El. ladet, die anziehend und daher verzögernd auf die El. im Drahte wirkt; diese Verzögerung muß in verschiedenen Medien verschieden sein, weil die Influenz verschieden ist. Indessen sind auch theoretische Betrachtungen von Kirchhoff zu dem Schlusse gekommen, daß die El. in einem widerstandslosen Drahte nur eine Geschwindigkeit von 41950 M., gleich der des Lichtes, besitze, und daß sie daher in Widerstand leistenden Drähten noch kleiner sein müsse.

489 **Die Dielektricität** (Faraday 1838, Boltzmann 1872—75). Die Influenz wirkt bekanntlich meist durch Nichtleiter hindurch; da jedoch auch eine Influenz auf Nichtleiter stattfindet und nach Rieß sogar eine Influenz eines Nichtleiters auf sich selbst geschieht, so liegt der Gedanke nahe, daß die durch einen Nichtleiter hindurch wirkende Influenz auch auf diesen Nichtleiter selbst einen Einfluß ausübe, sowie daß umgekehrt dieser Nichtleiter auf die Influenz, welche durch ihn hindurch stattfindet, einwirken könne. Diese Einwirkung ist uns auch schon im Ansammlungsapparat begegnet, da wir dort erfuhren, daß bei Anwendung einer starren nichtleitenden Zwischenschicht zwischen den 2 Metallplatten des Condensators die Ladung unter übrigens gleichen Umständen stärker ausfalle, als bei dem Vorhandensein einer Luftschicht. Faraday fand nun zuerst, daß nichtleitende starre Zwischenschichten von verschiedenem Material einen verschiedenen Einfluß auf die Ladung des Condensators ausüben. Diese Eigenschaft eines Nichtleiters, die Ladung eines Condensators unter übrigens gleichen Umständen zu verändern, nannte Faraday die Dielektricität des Isolators. Die Dielektricitätsconstante eines Isolators ist die Zahl, welche angibt, wie viel mal so stark die Ladung des Condensators bei Anwendung einer Zwischenschicht aus dem Material des Isolators wird, als bei Anwendung einer Luftschicht, unter Voraussetzung gleicher Gestalt und Distanz der Platten und der Zuführung derselben Menge von Elektricität. So ist die Dielektricitätsconstante von Hartgummi = 3,2, d. h. ist zwischen zwei Condensatorplatten eine Schicht von Hartgummi statt einer Luftschicht, so wird die Ladung der Condensatorplatte bei gleicher Elektrisirung des Collectors 3,2 mal so stark als bei Anwendung einer Luftschicht. Boltzmann hat auch die Dielektricitätsconstante D für Schwefel, Paraffin und Kolophonium bestimmt, und fand für Schwefel D = 3,8, für Paraffin D = 2,3, für Kolophonium D = 2,5. Diese Verschiedenheit zwingt, wie die Eingangs erwähnten Erscheinungen, zu dem Schlusse, daß in dem dielektrischen Körper ein elektrischer Vorgang stattfinde; man denkt sich, die neutrale Elektricität jedes Moleküls werde vertheilt; die neg. El. gehe nach dem der positiven Platte zugewendeten Ende des Moleküls und die pos. nach der der neg. Platte zugekehrten Seite desselben; oder auch sämmtliche Moleküle, in denen die beiden El. schon in der angegebenen Weise getrennt seien, würden in die eben angegebene Lage gedreht. Diesen Zustand nennt man dielektrische Polarisation. Nach Boltzmann unterscheiden sich die Erscheinungen dieses Zustandes wesentlich von den durch Spuren von Leitung hervorgerufenen Erscheinungen; die dielektrische Polarisation könne nie einen el. Strom hervorrufen, da mit ihrer Herstellung jede el. Bewegung zu Ende sei; außerdem geschehe sie in unmeßbar kurzer Zeit. Zwar habe schon Faraday bei manchen Körpern ein Wachsen der dielektrischen Polarisation wahrgenommen; dies sei jedoch einer dielektrischen Nachwirkung zuzuschreiben. Ob nun diese Anschauungen Boltzmanns richtig sind oder nicht, so muß doch die Folgerung zugegeben werden, daß ein dielektrisch polarisirter Körper jedenfalls von dem elektrischen Körper, dem er seine Polarisation verdankt, angezogen werde, da die entgegengesetzten Molekülenden dem letzteren näher sind als die gleichnamigen. Diese anziehende Wirkung, welche Boltzmann dielektrische Fernewirkung nennt, hat derselbe theoretisch berechnet und durch Versuche bestimmt. Die Uebereinstimmung der Versuchsresultate mit den theoretisch bestimmten spricht nicht nur für die Richtigkeit der Theorie, sondern auch für die der wichtigen noch anzuführenden Folgerungen. Schon Clausius hat die dielektrische Einwirkung auf eine Franklin'sche Tafel mathematisch untersucht: ausführlichere mathematische Theorien gaben zuerst Maxwell und noch vollständiger Helmholtz. Aus der Theorie von Helmholtz schloß nun Boltzmann, daß die Anziehung eines el. Körpers auf eine dielektrische Kugel $(D-1):(D+2)$ mal so stark (also kleiner) sei als auf eine gleich große leitende Kugel. Der reciproke Werth dieses Bruches ist z. B. für Schwefel 2; und wirklich ergaben zahlreiche Versuche, daß eine Schwefelkugel von einem el. Körper eine 2 mal kleinere Anziehung erfahre als eine gleich große Metallkugel. Bei diesen Versuchen wurde die El. des el. Körpers in 1 Sec. 200 mal gewechselt, ohne daß die Anziehung geändert wurde, woraus Boltzmann schloß, daß die dielektrische Polarisation in unmeßbar kurzer Zeit erfolge, daß sie also nicht mit der Influenz übereinstimme, indem bei dieser ein Auseinanderfließen der beiden El., also eine Leitung stattfinde, wofür immer gewisse Zeiten nöthig seien. Ob nun die Rieß'sche Influenz auf einen Nichtleiter mit der el. Polarisation zusammenfällt, oder ob dieselbe durch die Spuren von Leitung, die im Glase anzunehmen sind, vollbracht wird, läßt sich jetzt noch nicht entscheiden. Noch höheres Interesse erweckt eine andere Anwendung Boltzmanns der von ihm gefundenen Zahlen für D. Maxwell gelangt nämlich in seiner Theorie der Dielektricität zu der Gleichung $i = \sqrt{(D\mu)}$, worin i den Brechungsexponent und μ den Coëfficient der magnetischen Induction, dessen Bedeutung hier nicht gegeben werden kann, bezeichnet; es wäre also nach dieser Gleichung der Brechungsexponent das geometrische Mittel zwischen der Dielektricitätsconstanten und dem Inductionscoëfficient oder, da der letztere meistens = 1 ist, gleich der Wurzel aus der Dielektricitätsconstanten; diese Wurzel ist z. B. für

Schwefel nahezu = 2, und ebenso groß ist auch der Brechungsexponent des Schwefels. Noch genauer stellte sich dieser Zusammenhang für 7 verschiedene Gase heraus, deren D Boltzmann (1874) mittels einer Batterie von 300 Elementen untersuchte. Hierdurch gelangt die Lehre vom Lichte in einen inneren Zusammenhang mit der Lehre von der Elektricität, was auf einen inneren Zusammenhang dieser beiden Naturkräfte deutet, und demnach eine Möglichkeit eröffnet, zu dem Wesen der El. vorzubringen, dieselbe entweder als eine Bewegung des Aethers, oder, wie es Edlund thut, als Aether selbst aufzufassen. Daß ein innerer Zusammenhang zwischen dem Wesen des Lichtes und dem der Elektricität besteht, geht schon aus einer mathematischen Untersuchung Riemanns (1858) hervor, indem derselbe aus Gleichungen der Elektricitäts-Bewegung die Geschwindigkeit des Lichtes berechnete. Lorenz kommt auf Grund ähnlicher Rechnungen, die er mittels der Kirchhoff'schen (1867) Gleichungen der Elektricitätsbewegungen durchführte, zu der Ueberzeugung, daß die Schwingungen des Lichtes el. Ströme sind. — Die neueste dielektrische Forschung von Silow (1875) bestätigte einen anderen theoretisch von Helmholtz gefundenen Satz: Wenn 2 Mengen El. E und E' in einem dielektrischen Medium auf einander wirken, so wirken sie nur so, wie die Mengen $E : \sqrt{D}$ und $E' : \sqrt{D}$ in der Luft. Nach einer eigenen Methode fand Silow für Terpentinöl D = 2,22 und für 2 el. Massen in Terpentinöl den Helmholtz'schen Satz bestätigt.

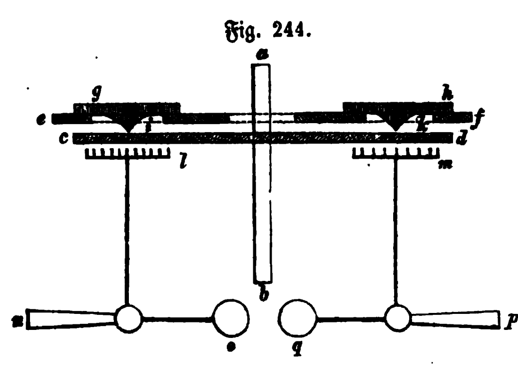
Fig. 243.



Die Holtz'sche Elektrisirmaschine, Influenzmaschine, Elektrophormaschine (Holtz 1865, Töpler 1865). Die Influenzmaschine gibt einen constanten Strom von Büschellicht oder von schwachen Funken oder auch eine Reihe von regelmäßig auf einander folgenden starken Funken zwischen zwei entgegengesetzt el. Conductorkugeln. Die Holtz'sche Einrichtung derselben ist aus Fig. 243, einer perspectivischen Vorderansicht, und aus Fig. 244, einem schematischen Horizontaldurchschnitte zu erkennen. Diese Maschine enthält zwei ganz nahe beisammenstehende, dünne Glasscheiben, die eine c d (B) (die eingeklammerten Buchstaben beziehen sich auf Fig. 243) mittels Kurbel, Rollen und Schnüren auf der Welle a b (x) sehr rasch drehbar, die andere e f (A) fest, von 4 Haltern (1, 3, 4) aus Hartkautschuk getragen und an dem Durchgangspunkte der Welle mit einer größeren Oeffnung versehen. Die 490

feste Scheibe e f (A) trägt an zwei diametralen Endstellen zwei Kuchen g und h (d und c) von Papier; über g (d) und unter h (c) sind Ausschnitte (a und b) in der festen Scheibe, durch welche Papierzähne i und k in die Nähe der drehbaren Scheibe ragen. Jenseits dieser drehbaren Scheibe stehen, den Papierkuchen gegenüber, also durch die zwei Scheiben von diesen getrennt, die Sauger l und m (ii und gg), von denen Messingstäbe zu den Conductoren no und pq (kp und fn) gehen, deren Kugeln q und o (p und n) durch Verschiebung und Drehung mittels der Handhaben p und n einander genähert und auch ganz aus einander gedreht werden können.

Fig. 244.



Um Versuche mit dieser Maschine anzustellen, nähert man die beiden Conductorkugeln einander bis zur Berührung, reibt ein Stück Hartgummi mit einem Katzenfelle, hält es hinter den Papierkuchen g (d) und versetzt die Scheibe c d (B) in Rotation, und zwar so, daß sie sich gegen die Zähne hin dreht; hört man ein knisterndes Geräusch, so zieht man die Conductoren aus einander und erhält dann zwischen den Kugeln einen oder ein ganzes Büschel gebogener, violetter Fäden, die unaufhörlich fortsprühen, so lange man dreht; nimmt man die Kugeln ab, so daß sich Spitzen gegenüber stehen, so entsteht ein aus unzähligen Fünkchen bestehendes Bündel. Legt man auf die Saugerstäbe den kleinen Condensator, eine belegte Glasröhre, so erhält man einen constanten Strom von Funken, die um so größer und knallender sind, je weiter man die Kugeln oder Pole von einander entfernt. Noch stärker, fast wie Pistolenknalle, werden die Funken, wenn man mit beiden Conductoren die innere und äußere Belegung einer elektrischen Flasche verbindet.

Rieß gibt von der Wirkung dieser Maschine folgende Erklärung: Die negative El. der Hartkautschukplatte, die man zuerst nähert, wirkt durch Influenz auf den gegenüberstehenden Sauger und Condnctor *l* n o, zieht die pos. El. in die Saugspitzen *l* und stößt die neg. in den Conductor n o; die pos. El. der Saugspitzen zieht aus der an dieser Seite aufwärts gedrehten Scheibe neg. El., strömt zu derselben und vereinigt sich mit ihr; demnach bleibt an jeder Stelle der Drehscheibe, die hinter den Saugspitzen *l* vorübergegangen ist, positive El. zurück, die ganze obere Hälfte der Scheibe ist positiv elektrisch. Durch die Drehung gelangt jede Stelle dieser Hälfte in die Nähe des Zahnes k und gibt diesem und dadurch dem Kuchen h fortwährend positive Elektricität. Dieser Kuchen zieht daher in die Spitzen m des ihm gegenüberstehenden Conductors fortwährend negative Elektricität, und stößt in die Kugel q pos. El.; die Kngel q ist daher fortwährend positiv elektrisch. Die neg. El. des Saugers m zieht aus den an ihr vorbeigehenden Streifen der Drehscheibe fortwährend pos. El., vereinigt sich mit ihr, neutralisirt sie und wird von ihr neutralisirt, und läßt daher in jedem vorbeigegangenen Streifen der sich hier nach unten drehenden Scheibe neg. El. zurück; die ganze untere Hälfte der Scheibe ist daher fortwährend neg.; diese neg. El. gelangt durch die Drehung an den Zahn i und geht auf den Kuchen g über. Demnach wird der Kuchen g sehr bald negativ und bleibt fortwährend so, übernimmt also die Rolle der Hartkautschnkplatte, die man folglich bald weglegen kann. Der nun negative Kuchen g zieht fortwährend pos. El. aus dem Sauger *l* und stößt neg. El. in den Conductor n o; die Kugel o ist daher fortwährend negativ elektrisch, und da die Kugel q immer pos. ist, so erklärt sich hieraus der fortwährende Funkenstrom, der entsteht, wenn die Kugeln durch Luft getrennt sind. Wenn die Kugeln oder Spitzen sich direct berühren oder durch einen Draht oder sonst einen Leiter verbunden sind, so vereinigen sich in demselben die 2 Elektricitäten immer im Momente ihrer Entstehung; diese Vereinigungen finden daher immer nur nach ganz kurzen Pausen statt, in eben so kurzen Pausen, als die Elektricitäten aus den Spitzen nach der drehbaren Scheibe hin ausströmen; diese Pausen sind um so kürzer,

je mehr die Spitzen sich mathematischen Punkten nähern. Gegen diese Erklärung wurde u. A. der Einwand erhoben, daß die auf der Vorderfläche der drehbaren Scheibe durch die Sauger influenzirte El. unmöglich durch die Scheibe hindurch auf die Zähne gelangen könne, da Glas ein Nichtleiter sei. Dieser Einwand ist durch die Influenz eines Nichtleiters auf sich selbst (Rieß 1873, s. 472.) gehoben, da jede El. der Vorderfläche gleichnamige El. auf der Hinterfläche influenzirt.

Mit dieser Maschine lassen sich die meisten elektrischen Versuche ausführen, selbst magnetische und chemische Wirkungen hervorbringen, die mittels einer stark geladenen Batterie nur sehr gering ausfallen. Schaltet man ein Rieß'sches Luftthermometer zwischen die Spitzen ein, so fällt die Flüssigkeit rasch; läßt man die Funken durch ein enges Glasrohr schlagen, so wird dasselbe bald so warm, daß man Streichhölzchen daran entzünden kann, Phosphor und Schießwolle entzünden sich zwischen den Spitzen sofort, fein zertheilte Kohle kommt ins Glühen, Feuerschwamm entzündet sich nur schwierig, Schießpulver gar nicht. Schaltet man ein mit verdünnten Dämpfen oder Gasen gefülltes Rohr, dessen Enden eingeschmolzene Platindrähte tragen, eine sogenannte Geißler'sche Röhre, zunächst in eine Seitenleitung der sich berührenden Conductoren ein und zieht nach Ingangsetzung der Maschine dieselben aus einander, so zeigt sich ein heller Lichtstrom, der bei Einschaltung von Condensatoren in geschichtetes Licht übergeht. — Läßt man den Funkenstrom direct auf die Haut übergehen, so entsteht ein brennendes und stechendes Gefühl; schaltet man den Körper zwischen den Kugeln ein, so erhält man besonders mit Anwendung der Flasche starke Zuckungen; doch muß eine Luftstrecke in den Schließungsbogen eingeschaltet sein. — Die Wasserzersetzung gelang Holtz nur mit in Glas geschmolzenen Drähten, an denen in feinem, continuirlichem Strome die Bläschen aufsteigen, und zwar am negativen Conductor etwa doppelt so viel als am positiven; da nun das Wasser aus 2 Vol. H und 1 Vol. O besteht, so folgt hieraus, daß der Wasserstoff an den negativen, der Sauerstoff an den positiven Conductor geht. Schaltet man in den Schließungsbogen eine Spule ein, auf welche ein Leitungsdraht vielfach gewunden ist, und hängt man in der Spule leicht beweglich eine Magnetnadel auf, so wird dieselbe bei dem Durchgehen des Funkenstromes aus dem magnetischen Meridian abgelenkt und strebt, sich auf die Richtung der Windungen senkrecht zu stellen. Auch nimmt der Nordpol immer dieselbe Lage an und bei entgegengesetzter Richtung des Stromes die entgegengesetzte Lage. Ampère hat eine practische Regel aufgefunden, wie man die Lage des Nordpoles gegen die Stromrichtung im Voraus angeben kann. Diese Ampère'sche Schwimmerregel lautet: Man denkt sich mit der positiven Elektricität in dem Stromleiter schwimmend (also der negativen Elektricität entgegen), und zwar in einer solchen Körperlage, daß man die Nadel vor sich sieht, so hat man den Nordpol zur Linken. Man kann diese Regel in ihrer Umkehrung dazu benutzen, zu finden, wie die positive Elektricität in einem eine Nadel ablenkenden Leiter fließt: Man denkt sich so in dem Strome schwimmend, daß man die Nadel sieht und den Nordpol zur Linken hat, so hat man den Kopf nach dem neg. und die Füße nach dem pos. Conductor gewendet.

491 Aufg. 727. Den Unterschied und die Uebereinstimmung der magn. und der el. Grunderscheinungen anzugeben. — A. 728. Den Unterschied anzugeben in unseren Vorstellungen über das Innere eines magn. und eines el. Körpers. — A. 729. Die Uebereinstimmung und den Unterschied hervorzuheben in unseren Vorstellungen über das Innere eines unmagn. und eines unel. Körpers. — A. 730. Warum kann man aus einem Menschen Funken ziehen, der auf einem Isolirschemel stehend einen Harzkuchen mit einem Fuchsschwanze peitscht; welche El. enthält er? — A. 731. Warum kann man an der Anziehung eines el. Körpers durch einen geriebenen Stab die Art der El. nicht erkennen? (s. 473. 3). — A. 732. Der Coulomb'sche Versuch, mit welchem das Entfernungsgesetz (468.) nachgewiesen wurde, bestand noch aus einer 3ten Abtheilung; der Torsionsknopf wurde noch auf $8{,}5^0$ zurückgedreht; welche Torsion war hierzu nöthig? Aufl.: $575{,}5^0$. — A. 733. Die el. Abstoßung in der Entf. 1 sei F, die halbe Länge des Wagebalkens r; wie groß ist die Abstoßung nach der Ablenkung α? Aufl.: $F \cos {}^1/_2\alpha : (4r^2 \sin^2 {}^1/_2\alpha)$. — A. 734. Durch zwei Elektricitätsmengen e und e' werden zwei Ablenkungen hervorgebracht, die durch die Torsionen t und t' auf die Winkel α und α' gebracht werden; wie verhalten sich die Elektricitäten? Aufl.: $e' : e = (t' + \alpha') \sin {}^1/_2\alpha' . \operatorname{tang} {}^1/_2\alpha' : (t + a) \sin {}^1/_2\alpha . \operatorname{tang} {}^1/_2\alpha$. — A. 735. Wie wird das Verhältniß, wenn in beiden Fällen bis zur Ablenkung α tordirt wird? Aufl.: $e' : e = (t' + \alpha) : (t + \alpha)$. — A. 736. Wie wird das Verhältniß, wenn die Ablenkung α schon vor dem Versuche hervorgebracht wird? Aufl.: $e' : e = t' : t$. — A. 737. Welches ist der Vorgang der Influenz, wenn ein pos. Körper influenzirt, und welches bei einem negativen? — A. 738. Die el. Anziehung eines pos. Körpers gegen einen unel. durch Influenz zu erklären; ebenso eines negativen? — A. 739. Die Coulomb'schen Gesetze über die Menge der Influenzelektricitäten durch die Drehwage zu finden. — A. 740. Den

Vorgang beim Korkkugeltanz zu erklären. — A. 741. Das el. Glockenspiel in seiner el. Wirkung aus einander zu setzen. — A. 742. Aus dem Poisson'schen Grundsatze (480) abzuleiten, daß bei der Kugel die El. überall gleichmäßig vertheilt ist, und beim Ellipsoid an den spitzigen Scheiteln am stärksten sein muß. — A. 743. Die Magnus'sche Rolle in ihrer el. Wirkung zu erklären. — A. 744. Warum ist Staub auf Conductoren sehr schädlich? — A. 745. Der el. Fisch, der in der Nähe des Conductors frei schwebt, verhält sich verschieden, je nachdem er das spitze oder stumpfe Ende demselben zuwendet; wie und warum? Aufl.: Im ersten Falle angezogen, im letzten abgestoßen; Spitzenwirkung. — A. 746. Warum muß man, um am Elektrophor einen el. Schlag zu erhalten, zuerst die Form berühren und dann den Schild? Ant.: Die neg. Schildel. ist abgestoßen. — A. 747. Wievielmal größer ist die abstoßende Wirkung einer Kugel, wenn sie 8mal soviel El. enthält und 3mal näher kommt? Aufl.: 72. — A. 748. Wie groß muß die Elektricitätsmenge sein, welche in der 5fachen Entf. auf die 7fache Masse die doppelte Anziehung ausübt? Aufl.: 350. — A. 749. Wie groß ist die el. Dichte einer Fläche 5, welche die El. 10 enthält? Aufl.: 2. — A. 750. Zwei gleiche Kugeln enthalten die El. 7 und 12; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 7 : 12. — A. 751. Zwei Kugeln, deren Radien sich wie 7 : 11 verhalten, enthalten dieselbe El.; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 121 : 49. — A. 752. Zwei Kugeln, deren Radien 3 und 5cm sind, enthalten die El. 7 und 10; wie verhalten sich die Dichten? Aufl.: 63 : 250.

2. Der elektrische Strom oder der Galvanismus.

1. Entstehung des elektrischen Stromes.

492 **1. Entstehung des elektrischen Stromes durch den chemischen Proceß** (Galvani 1789, Volta 1794, Delarive 1836). Der el. Strom ist die fortwährende Erzeugung und Vereinigung der beiden El. in einem Leiter. Sehr kurze Zeit dauernde oder momentane Ströme sind schon in der Lehre von der Reibungselektricität aufgetreten: Wenn man am Elektrophor die Form mit dem Daumen und den Schild mit dem Finger berührt, so geht durch die Hand ein el. Strom, weil sich dann in der Hand die negative El. des Schildes mit der positiven der Form vereinigt. Der Schließungsbogen der el. Flasche wird während der Entladung von einem el. Strome durchflossen, indem die pos. El. des inneren Beleges und die neg. des äußeren Beleges in dem Schließungsdrahte einander entgegenströmen und sich vereinigen. Auch mittels der gewöhnlichen Elektrisirmaschine ist ein el. Strom möglich, wenn man die beiden geladenen Conductoren durch einen Leiter verbindet. Doch haben alle diese Ströme nur eine sehr kurze Dauer, sie sind momentane Ströme, die wir zur deutlichen Unterscheidung el. Schläge nannten. Die Influenzmaschine gibt nun zwar einen Strom von el. Schlägen, einen Funkenstrom; die Zeiten zwischen den einzelnen Schlägen sind bei Einschaltung der Flasche größer, kleiner bei Einschaltung des kleinen Condensators, noch kleiner, wenn sich die Conductorkugeln oder die Spitzen ohne Einschaltung gegenüberstehen, und am allerkleinsten, wenn dieselben sich direct berühren oder durch einen Leiter verbunden werden. Aber Zwischenzeiten sind auch hier, wenn auch unmeßbar klein, vorhanden, weil eine Entladung immer nur stattfindet nach einer Ausströmung an den Saugspitzen, und weil diese Ausströmung nur bei mathematischen Spitzen continuirlich, bei den wirklichen aber mit Unterbrechungen stattfindet. Es treten demnach in allen diesen Fällen nur momentane Ströme auf oder auf längere oder kürzere Zeit unterbrochene Folgen solcher el. Schläge. Dagegen eine ununterbrochene Gegenströmung der beiden El., eine fortwährende Erzeugung und Vereinigung derselben, ein continuirlicher el. Strom läßt sich durch diese Einrichtungen nicht erzielen. Man erhält aber diesen eigentlichen el. Strom durch das Eintauchen zweier verschiedenen Metalle in eine Flüssigkeit, z. B. von Zink und Kupfer in Wasser, dem etwas Schwefelsäure zugesetzt wurde. Verbindet man die hervorragenden Enden der beiden

Metallstücke durch einen Draht, so ist dieser Schließungsbogen von einem continuirlichen Strome durchflossen. Man überzeugt sich von dem ununterbrochenen Vorhandensein dieses Stromes dadurch, daß man den Draht an einer Magnetnadel vorbeigehen läßt; die Nadel wird dann ununterbrochen nach einer zu der Drahtrichtung senkrechten Richtung abgelenkt. Aus der Lage des Nordpoles kann man auch nach Ampères Schwimmerregel erkennen, in welcher Richtung die pos., und in welcher die neg. El. fließt. Man denkt sich so in den Draht hinein, daß man die abgelenkte Nadel sieht und den Nordpol derselben zur Linken hat; man hat dann den Kopf dem Zink, die Füße dem Kupfer zugewendet, woraus hervorgeht, daß die pos. El. vom Kupfer, die neg. vom Zink herkommt. Die Verbindung der zwei Metalle mit der Flüssigkeit, durch welche demnach ein el. Strom entsteht, nennt man ein galvanisches Element oder eine galvanische Kette, das Zinkende nennt man den negativen Pol, das Kupferende den positiven Pol der Kette, weil aus dem ersteren die neg., aus dem letzteren die pos. El. herausfließt. Sind die beiden Pole durch den Schließungsbogen verbunden, so daß der el. Strom stattfindet, so sagt man: der Strom ist geschlossen; wird die Verbindung an irgend einer Stelle aufgehoben, wodurch der el. Strom zu Ende ist, so gebraucht man den Ausdruck: der Strom ist geöffnet. Die im geschlossenen Strome vorhandene, continuirlich gegenströmende El. wird auch galvanische Elektricität oder auch Galvanismus genannt. Der el. Strom ist bei geschlossenem Strome nicht blos in dem Schließungsbogen, sondern auch in der Flüssigkeit vorhanden; man sieht dies daran, daß beim Schließen des Stromes eine lebhafte Zersetzung der Flüssigkeit stattfindet, was ja bekanntlich geschieht, wenn durch eine Flüssigkeit ein el. Strom geht. Könnte man die an beiden Metallen aufsteigenden Gasbläschen sammeln, so würde man sehen, daß an das Zink Sauerstoff und an das Kupfer Wasserstoff geht, woraus sich ergeben würde, daß der eingetauchte Theil des Zinkes pos., der eingetauchte Theil des Kupfers neg. ist. Dies folgt aber auch schon daraus, daß das hervorragende Zinkende neg. El. liefert; da die El. nur aus der neutralen El. des Zinkes durch Vertheilung in negative und positive entstehen kann, und da die negative immer in das hervorragende Zinkende geht, so muß die positive in dem eingetauchten Zinktheile zurück bleiben; aus ähnlichen Gründen (494.) muß das Kupfer am eingetauchten Theile neg. sein. Die beiden El. der eingetauchten Theile strömen durch die Flüssigkeiten zu einander, vereinigen sich und zersetzen hierbei die Flüssigkeit; der el. Strom ist demnach eigentlich ein Kreisstrom, er ist im äußeren, metallischen Schließungsbogen von entgegengesetzter Richtung, wie in dem inneren flüssigen Bogen. Um die Richtung zu fixiren, ist man übereingekommen, immer nur die Richtung der pos. El. zu nennen. Sagt man also, der Strom geht im Schließungsbogen vom Kupfer zum Zink, so ist damit die pos. El. gemeint, und von der neg. versteht sich dann die entgegengesetzte Richtung von selbst.

Ueber die Entstehung des el. Stromes sind die Physiker noch nicht einig, und der Streit über die Ursache der Entstehung geht bis zur Entdeckung des el. Stromes zurück. Luigi Galvani, Professor der Anatomie zu Bologna, hatte (1789) Froschschenkel auf einen Tisch in der Nähe einer Elektrisirmaschine gelegt und beobachtete Zuckungen an denselben, so oft ein Funke aus dem Conductor sprang. Da er die Erscheinung des Rückschlages, der die Zuckungen erzeugte, nicht kannte, so schrieb er dieselben der thierischen El. zu, die durch den Funken erregt werde. Um nun zu untersuchen, ob die atmosphärische El. einen ähnlichen Einfluß auf die thierische El. habe, hing er mehrere Froschschenkel mit einem kupfernen Haken an einem eisernen Gitter seines Gartens auf; als nun zufällig die am Kupfer hängenden Schenkel das Eisen berührten, entstanden die lebhaftesten Zuckungen; auch diese erklärte Galvani als Aeußerungen der thierischen El.; dieselbe sei in den Muskeln und in den Nerven in entgegengesetzter Art vorhanden, werde durch die Metalle vereinigt, und erzeuge so wie eine Flasche die Muskelzusammenziehungen. Obwohl bei der allgemeinen

Annahme dieser falschen Erklärung die ganze Sache eingeschlafen wäre, so hat doch die ganze große aus jener kleinen Beobachtung hervorgegangene Wissenschaft und Technik den Namen Galvanis verewigt. Weiter verfolgt wurde die Erscheinung von Alexander Volta, Professor zu Pavia (1794). Er wiederholte den Versuch Galvanis mit der nahe liegenden Aenderung, statt der zwei Metalle Kupfer und Eisen nur eines zu nehmen. Als nun die Zuckungen ausblieben oder wenigstens sehr unregelmäßig und unbedeutend auftraten, kam er auf den Gedanken, daß die hierbei wirksame El. durch Berührung der beiden verschiedenen Metalle entstehe, und untersuchte demgemäß sorgfältig, ob durch Berührung zweier Metalle auch ohne die Froschschenkel El. auftrete. Da seine und zahlreiche folgende Versuche diese Frage bejahten, so entstand hieraus die Ansicht, der el. Strom entstehe durch Berührung oder Contact; diese Ansicht, die Contacttheorie, welche so viel Geltung fand, daß noch jetzt in manchen Büchern die Abtheilung vom el. Strome die Ueberschrift Contactelektricität führt, stützt sich auf eine Reihe von Versuchen Voltas, die unter dem Namen Voltas Fundamentalversuche bekannt sind.

493 Voltas Fundamentalversuche bedürfen eines sehr empfindlichen, z. B. des Bohnenberger'schen Elektrometers in Verbindung mit dem Condensator. Man nimmt zwei ebene Platten von Zink und Kupfer an isolirenden Handhaben, setzt sie auf einander, nimmt sie dann parallel von einander, und berührt mit der einen Platte den auf das Elektrometer geschraubten Collector, während man den Condensator ableitend mit der Hand berührt. Wiederholt man dies öfter und hebt dann den Condensator ab, so geht das Goldblättchen zu einem der beiden Pole hin, ein Zeichen, daß die Platte el. war. Man kann den Versuch auch mit einer Doppelplatte machen, die aus einer Zink- und einer Kupferplatte durch Zusammenlöthen an einer Kante entstanden ist, oder noch einfacher dadurch, daß man die Zinkplatte an die Stelle des Collectors schraubt und die Kupferplatte wie den Condensator aufsetzt. Bei allen diesen Versuchen zeigt sich das Zink immer, in Berührung mit allen Metallen, und von allen am stärksten pos., das Kupfer neg.; ebenso wird bei der Berührung anderer Metalle mit einander das eine neg., das andere pos. Man hat auch hier die Stoffe in eine sogenannte Spannungsreihe geordnet, in welcher immer das vorausgehende Metall in Berührung mit dem folgenden pos., das folgende neg. wird. Die Spannungsreihe Voltas ist: Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Kohle. Andere Forscher geben die Reihe etwas anders an, wie auch die Differenzen der el. Dichten der einzelnen Plattenpaare verschieden angegeben werden. Kohlrausch (1851) fand, wenn die Spannungsdifferenz für das Plattenpaar Zink — Kupfer ($Zn \mid Cu$) = 100 gesetzt wird, daß die Differenz $Zn \mid Au = 113$, $Zn \mid Ag = 106$, $Zn \mid Pt = 107$, $Zn \mid Fe = 75$, $Fe \mid Cu = 31$, $Fe \mid Pt = 32$, $Fe \mid Au = 40$, $Fe \mid Ag = 30$. Die Ursache davon, daß die neutr. El. eines Plattenpaares sich vertheilt und die eine Platte pos., die andere neg. wird, nennt man die elektromotorische Kraft, und die durch Berührung el. werdenden Metalle Elektromotoren der ersten Klasse. Dieselben gehorchen folgenden Gesetzen: Je größer der Abstand der Metalle in der Spannungsreihe ist, desto größer ist ihre el. Differenz. Die el. Differenz zweier Metalle in der Spannungsreihe ist gleich der Summe der el. Differenzen aller zwischenliegenden, ist daher dieselbe, ob zwei Metalle sich direct, oder mit Zwischenschaltung einer beliebigen Anzahl Metalle berühren; sie ist auch unabhängig von der Berührungsdauer, von der Größe der sich berührenden Körper und der Anzahl der Berührungspunkte; es ist demnach eine directe Berührung der beiden Platten gar nicht nöthig, wenn sie nur metallisch verbunden sind; ja sogar schon bei der blosen Annäherung tritt eine el. Differenz auf (Voltas Grundgesetze 1797, Fechner 1838).

Die Anhänger der Contacttheorie erklären die Entstehung des el. Stromes durch diese Berührungsel. in folgender Weise: Wenn die in Flüssigkeit eingetauchten 2 Metallstücke durch einen Draht verbunden werden, so kommt die elektromotorische Kraft zur Wirkung; da nach der metallischen Verbindung das Zink pos. und das Kupfer neg. ist, so muß während derselben vermöge der elektromotorischen Kraft eine solche Vertheilung der El. stattfinden, daß vom Kupfer zum Zink pos., vom Zink zum Kupfer neg. El. übergeht, und diese Gegenströmung ist es ja, was den el. Strom ausmacht.

Indessen wurde außer der Berührung zweier Metalle noch eine zweite Berührungsquelle der El. aufgefunden, nämlich die Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten, welche man deßhalb Elektromotoren der zweiten Klasse nannte. Becquerel (1824), Pfaff (1840), Buff (1842) und andere Forscher fanden, daß Metalle in Berührung mit Flüssigkeiten meistens neg., diese aber pos. werden; doch ist auch die entgegengesetzte Ladung nicht selten. Buff schraubte eine Platte des Metalls auf ein Elektroskop, legte darauf eine etwas größere Glasplatte und auf diese eine mit der Flüssigkeit getränkte Papierscheibe, welche ein von der Metallplatte heraufgebogener Draht von dem-

selben Metall berührte. Péclets Messungen (1841) ergaben für Zink in Berührung mit verdünnter Schwefelsäure die Elektricitätsmenge — 27, mit verdünnter Salpetersäure — 26, mit Kalilauge — 30, mit Schwefelkalium — 30; für Blei mit diesen 4 Flüssigkeiten — 14, — 13, — 24, — 17, für Eisen — 13, — 8, — 19, — 17, für Kupfer — 2 (mit Salpeters. nicht), — 11, — 22, für Platin + 6, + 4, — 5, — 17. Hieraus ist ersichtlich, daß die Metalle, welche in der Spannungsreihe an der Spitze stehen, am stärksten und zwar neg. el. werden; es sind dies diejenigen Metalle, die bei der Berührung am stärksten von der Flüssigkeit chemisch angegriffen werden; dagegen die weiter in der Spannungsreihe zurückstehenden Metalle (Platin steht z. B. zwischen Gold und Kohle) werden schwach neg. oder gar pos. Bei gewöhnlichen Verhältnissen zeigen sich die El., die durch Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten entstehen, viel schwächer als die durch Berührung von Metallen unter sich entstehenden El.; in manchen Fällen werden diese von jenen übertroffen. Kohlrausch gibt z. B. an, wenn die El. von Zn | Cu = 100 sei, so entstehe bei der Berührung von amalgamirtem Zink mit Schwefelsäure 149, von Zink mit Schwefelsäure 115, von Platin mit Salpetersäure 149, von Kupfer in Kupfervitriol 21. Auch diese El. hält man für eine Folge der Berührung und erklärt aus derselben den el. Strom folgendermaßen. Wenn Zink und Kupfer, jedes für sich, in Schwefelsäure eingetaucht werden, so ist das hervorragende Ende des Zinkes stärker neg., das eingetauchte Ende und die Flüssigkeit stärker pos.; ebenso ist das herausragende Kupferende schwach neg. und das eingetauchte Kupferende und die Flüssigkeit ebenso schwach pos. Werden nun Zink und Kupfer zusammen in Schwefelsäure getaucht, so stößt daß eingetauchte Zinkende die starke pos. El. der umgebenden Flüssigkeit in das Kupfer bis in das hervorragende Ende desselben; dort ist zwar ein wenig neg. El., welche die hierhergestoßene pos. El. ein wenig durch Neutralisation vermindert; es bleibt aber doch ein Ueberschuß von pos. El. im hervorstehenden Kupferende zurück; das Kupferende ist der pos. Pol der Kette. Ebenso stößt das eingetauchte Kupfer die schwach pos. El. der umgebenden Flüssigkeit in das Zink bis in das hervorragende Zinkende, wo sich schon stärkere neg. El. befindet; diese wird zwar durch die hierher gestoßene pos. El. ein wenig vermindert; es bleibt aber dennoch ein Ueberschuß von neg. El. in dem hervorstehenden Zinkende zurück; das Zinkende ist der neg. Pol der Kette. Verbindet man die beiden Pole durch einen Schließungsdraht, so vereinigen sich in demselben die beiden El., es entsteht der el. Strom; und zwar ist derselbe ununterbrochen oder continuirlich, weil seine Quelle, die Berührung der Metalle mit der Flüssigkeit ohne Unterbrechung fortdauert; dieser so entstandene Strom wird noch durch die erste Quelle verstärkt, nämlich durch die beim Schließen des Stromes hergestellte metallische Verbindung der zwei Metalle, welche, wie oben gezeigt, für sich einen elektrischen Strom genau in demselben Sinne erzeugen. Der el. Strom wäre dieser Theorie nach zwei Quellen zu verdanken: der Berührung der beiden Metalle unter sich, und der Berührung der Metalle mit der Flüssigkeit, im Grunde aber der versch. Anz. der versch. Metalle auf die beiden El.

Gegen diese Contacttheorie erhob sich, getragen von Delarive (1836) und Faraday die chemische Theorie, welche den elektrischen Strom als das Product eines chemischen Processes ansieht. Sie stützt sich darauf, daß in jeder einen el. Strom erzeugenden Kette lebhafte chemische Processe stattfinden, daß die Stärke des Stromes mit der Lebhaftigkeit der chemischen Processe wächst, und daß ohne einen chemischen Proceß durch eine Kette kein nennenswerther el. Strom entsteht. Sie erklärt auch die angeführten Versuche, nach denen Metalle mit Flüssigkeiten und unter sich el. werden, als chemische Processe; bei der Berührung von Metallen mit Flüssigkeiten seien dieselben leicht wahrzunehmen, und bei der Berührung von Metallen unter sich entständen die chemischen Processe durch die Wirkung von Wasser- und Lufthäuten oder der feuchten Finger. Auch seien die Elektricitätsmengen, welche scheinbar durch diese Berührungen entständen, zu klein, um die Stärke des el. Stromes zu erklären; sie könnten aber dazu ausreichen, den chemischen Proceß einzuleiten; denn durch das Schließen dieser schwachen El. verstärke sich bedeutend der chemische Proceß in der Kette und dadurch auch der el. Strom, in ähnlicher Weise wie Verbrennung und Wärmeentwickelung sich gegenseitig steigerten. Am meisten aber spreche gegen die reine Contacttheorie das Princip von der Erhaltung der Kraft, nach welchem eine Kraft unmöglich aus Nichts erzeugt werden könne, und eine solche Erzeugung aus Nichts sei die Ableitung der starken Kraft des el. Stromes aus der Berührung, bei welcher die Arbeit Null betrage. Man kann sich die Erzeugung des el. Stromes in gleicher Weise denken wie die der Wärme; wie bei der chemischen Vereinigung die zusammenströmenden Moleküle durch den Zusammenstoß in schwingende Bewegung gerathen, die ihre Wärme ausmacht, so kann auch eine andere, uns noch unbekannte molekulare Bewegung entstehen, deren Aeußerungen wir El. nennen.

Die galvanischen Batterien bestehen aus mehreren mit einander verbundenen galvanischen Ketten; das Kupfer der ersten Kette wird mit dem Zink der zweiten 494

metallisch verbunden, das Kupfer der zweiten Kette mit dem Zink der dritten u. s. w. Ist die El. des Zinkes einer Kette — e und die des Kupfers + e, so hat das erste Zinkende einer Batterie von n Ketten die El. — ne und das letzte Kupferende die El. + ne. Zur Erklärung kann man sich folgende Vorstellung erlauben: Da das in der Flüssigkeit pos. Zink die pos. El. der umgebenden Flüssigkeit in das hervorragende Kupferende hineinstößt, so muß dieselbe durch die metallische Verbindung in das zweite Zink und durch dieses und die Flüssigkeit in das zweite Kupferende gestoßen werden, so daß dieses die doppelte pos. El. besitzt; diese strömt durch die metallische Verbindung, durch das dritte Zink und die Flüssigkeit auf das dritte Kupferende über, wodurch dieses die dreifache pos. El. erhält. Ebenso gewinnt das vierte Kupferende die vierfache und das letzte Kupferende die n fache pos. El. Ganz in derselben Weise stößt das letzte herrausragende Zink durch die metallische Verbindung, das vorletzte Kupfer und die Flüssigkeit seine neg. El. auf das vorletzte Zinkende, das schon neg. El. und daher durch den Zufluß die zweifache Menge erhält; diese fließt ebenfalls weiter, vereinigt sich mit der neg. El. des drittletzten Zinkendes und verdreifacht dieselbe; so erhält das erste Zinkende die n fache neg. El. Die neg. El. nimmt nach dem Anfange der Batterie hin zu, die pos. nach dem Ende der Batterie hin; in der Mitte sind beide gleich stark und heben sich auf. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, daß in der Flüssigkeit immer vom Zink zum Kupfer pos., und vom Kupfer zum Zink neg. El. strömt, daß also das eingetauchte Kupfer neg. ist. Dieser innere Strom zersetzt die Flüssigkeit. Wie nun 2 Met. der Volta'schen Spannungsreihe durch Berührung entgegengesetzt el. werden, so auch alle Elemente; dieselben bilden demnach eine vollständige Spannungsreihe, an deren pos. Ende Kalium und Wasserstoff, am neg. der Sauerstoff stehen; deßhalb geht immer das pos. Element der zersetzten Flüssigkeit, z. B. der H an das neg. K. und das neg. z. B. der O an das pos. Z. oder allgemeiner: der pos. Strom führt das pos. Element, der neg. Strom das neg. Element mit sich fort. Galvanische Batterien gibt es mancherlei Constructionen.

1. **Die Volta'sche Säule** (1800) besteht gewöhnlich aus Doppelplatten, die aus je einer Zink- und einer Kupferplatte zusammengelöthet sind. Auf eine Grundplatte wird isolirt zwischen drei oder vier Glassäulen eine Doppelplatte, das Zink nach unten, gelegt, darauf wird ein in gesäuertem Wasser angefeuchtetes Tuchläppchen gebreitet, auf dieses kommt wieder eine Doppelplatte, das Zink nach unten, dann wieder ein Tuchscheibchen, und so wird weiter gebaut bis zur letzten Doppelplatte; dann wird ein Schraubendeckel auf die Glasstäbe befestigt und mittels einer Schraube die Säule ein wenig befestigt. Das unterste Zink und das oberste Kupfer haben keine Bedeutung. Das erste Element ist das Zink der obersten Doppelplatte, das feuchte Läppchen und das Kupfer der zweiten Doppelplatte; jenes Zink ist der negative Pol der Säule. Das letzte Element ist das Zink der vorletzten Doppelplatte, das unterste feuchte Läppchen und das Kupfer der letzten Doppelplatte; dies bildet den pos. Pol. Verbindet man die beiden Pole durch einen Draht, so wird derselbe von einem el. Strome durchflossen, der besonders starke physiologische und Funkenwirkungen hat. An dem oberen Ende kann man durch ein Elektroskop freie neg., am unteren freie pos. El. nachweisen, deren Stärke nach der Mitte hin abnimmt und in der Mitte = Null ist, wodurch die Säule einige Aehnlichkeit mit einem Magnet gewinnt; auch durch die Abnahme der Zuckungen, die man erfährt, wenn man nach und nach immer mehr nach der Mitte zu liegende Stellen mit beiden Händen berührt, ist die Abnahme der freien El. nach der Mitte zu erkennbar. Wird die eine El. durch ableitende Verbindung eines Poles mit der Erde fortgeführt, so wird die Menge der freien El. am anderen Pole verdoppelt, die Ablenkung des Elektroskops an demselben wird stärker, und dieselbe Art von El. ist mit abnehmender Stärke bis zum ersten Pole auf die ganze Säule verbreitet. Weil durch das Gewicht der Platten die Flüssigkeit der Läppchen herausgepreßt wird, wodurch leitende flüssige Streifen an den Seiten entstehen, welche die El. durch Vereinigung neutralisiren, so wird die Volta'sche Säule bald nach ihrem Aufbau schwach.

2. **Zambonis trockene Säule** (Behrens 1804, Zamboni 1812). Man klebt einen Bogen Goldpapier (Messing) und einen Bogen Silberpapier mit den Papierseiten zusammen, schneidet daraus kleine, gleich große Stückchen, schichtet sie, immer das eine Metall nach derselben Seite gerichtet, in einer wohl isolirenden Glashülse auf einander, und schließt

dieselbe durch 2 Messingkapseln. Der feuchte Leiter ist hier durch das verkleisterte, hygroskopische Papier vertreten, die beiden Metalle sind Kupfer und Zinn; die eine Messingkapsel ist pos., die andere neg.; die el. Differenz hält Jahre lang, kann auch ziemlich bedeutend sein, ohne indessen Stromwirkungen hervorzubringen, weil das Papier nur langsam leitet. Die wichtigste Anwendung dieser Säule ist das Behrens'sche und das Bohnenberger'sche Elektroskop. Auch ein elektrisches Perpetuum mobile ist durch dieselbe möglich.

3. **Voltas Becherapparat** (1800), **Cruikshanks Trogapparat** (1802), **Wollastons Säule** (1815) und **Hares Spirale** (1821) suchen den angeführten Nachtheil der Volta'schen Säule zu vermeiden. Volta stellte zu dem Zwecke einzelne Becher auf, in welche er je eine Zink- und eine Kupferplatte brachte, und immer das Kupfer des vorhergehenden mit dem Zink des folgenden Bechers verband. Cruickshank setzte an Stelle der größeren Becherzahl einen einzigen Holztrog mit Seitenfugen, in welche je eine Doppelplatte eingesetzt wurde; durch Ausgießen des Wassers ist der Apparat außer Gang gesetzt. Wollaston verbesserte Voltas Bechersäule dadurch, daß er alle Platten an einem gemeinschaftlichen Holzrahmen befestigte und sie zusammen in die passend untergestellten Becher oder in einen Trog einsetzte, welche Form vielfache Umänderungen erfahren hat. Hare wickelte zwei durch Tuchstreifen vor metallischer Berührung bewahrte Bleche von Kupfer und Zink um einen Holzcylinder, der mittels eines Trägers in ein passendes Flüssigkeitsgefäß eingesetzt wurde.

Die constanten Ketten. Alle Ketten, welche aus zwei Metallen und einer Flüssigkeit bestehen, also alle so eben betrachteten Einrichtungen verlieren sehr rasch ihre Kraft. Die Ursache dieser Erscheinung liegt darin, daß der el. Strom auch durch die Flüssigkeit geht. Hierdurch wird das Wasser zersetzt in Sauerstoff und Wasserstoff; der Sauerstoff geht an das Zink und der Wasserstoff zum Kupfer. Das Zink vereinigt sich mit dem Sauerstoff zu Zinkoxyd, einer weißen, erdigen, nicht leitenden Masse, welche das Zink bedecken und so die Einwirkung der Flüssigkeit auf das Zink, wie auch die Leitung hemmen würde, wenn nicht die Schwefelsäure vorhanden wäre, die mit dem Zinkoxyd Zinkvitriol, ein im Wasser lösliches Salz bildet ($H_2SO_4 + ZnO = ZnSO_4 + H_2O$) und dadurch das Zink in metallischer Berührung mit der Flüssigkeit erhält; hieraus ergibt sich denn die Nothwendigkeit der Schwefelsäure. Wenn so die schädliche Einwirkung des Sauerstoffs beseitigt ist, so bleibt doch noch die des Wasserstoffs; derselbe wird durch die Anziehung des Kupfers auf demselben verdichtet und bildet eine Lufthaut, welche die Einwirkung der Flüssigkeit auf das Kupfer verhindert, welche als schlechter Leiter die fortwährend nothwendigen Strömungen der El. unmöglich macht, und welche endlich selbst einen entgegengesetzten Strom hervorruft, weil ja an der Stelle des in der Flüssigkeit negativen Kupfers nun eine positive Gasschicht mit der Flüssigkeit in Berührung steht. Hierdurch wird die Wirkung der Kette bald geschwächt; um sie für längere Zeit constant zu halten, um also constante Ketten zu erzielen, muß der Wasserstoff beseitigt werden. Dieses geschieht meistens durch Einführung eines Stoffes, der leicht Sauerstoff abgibt und dadurch den Wasserstoff zu Wasser oxydirt; damit dieser oxydirende Stoff sich nicht mit dem gesäuerten Wasser menge, ist er meistens in eine sehr poröse Thonzelle eingeschlossen, deren Porosität so groß sein muß, daß sie Gasatomen den Durchgang gestattet, und daß sie sich durchfeuchtet und so einen guten Leiter bildet, ohne die Flüssigkeiten durchtreten zu lassen. Kann man hierbei noch eine Flüssigkeit als Oxydationsmittel anwenden, in welcher das zweite Metall der Kette an seinem hervorragenden Ende pos. oder noch schwächer neg. als Kupfer wird, so gewinnt die Kette auch an Kraft. Dieser letzte Gedanke ist durchgeführt in Groves und in Bunsens Kette. 495

1. **Groves Kette** (1839). Zink taucht in verdünnte Schwefelsäure, Platin in Salpetersäure, welche in einer Thonzelle in dem Schwefelsäuregefäß steht. Diese Kette ist sehr kräftig, weil das Platin in der Salpetersäure am herausragenden Ende stark pos., am eingetauchten Theile also an sich neg. wird, weil also die vom eingetauchten Platinende abgestoßene El. die des Zinkes nicht wie in der Zinkkupferkette vermindert, sondern vermehrt, und weil ebenso die vom eingetauchten Zinkende abgestoßene El. die pos. El. des Platins vermehrt. Das Zink hat nach Kohlrausch durch seine Berührung mit Schwefelsäure die

El. — 149, (s. 493.), es erhält von dem eingetauchten die Salpetersäure berührenden Platin ebenfalls — 149, und durch Verbindung mit dem Platin — 107, folglich ist seine El. = — 405. Ebenso hat das Platin durch seine Berührung mit Salpetersäure die El. 149, es erhält von dem eingetauchten Zink 149 und durch Berührung mit demselben 107, zusammen + 405. Die Constanz der Kette wird dadurch erhalten, daß der bei der Zersetzung des Wassers frei werdende Wasserstoff der Salpetersäure Sauerstoff entzieht, sich dadurch zu Wasser oxydirt, welches allmälig die Salpetersäure verdünnt, während das durch Reduction der Salpetersäure entstehende Stickoxyd sich theils unter Bildung von Stickstoffdioxyd in der Salpetersäure löst und dieselbe grün färbt, theils in die Luft entweicht und sich dort mit Sauerstoff zu den orangefarbigen Dämpfen von Stickstoffdioxyd (NO_2) vereinigt: $2(HNO_3) + 6H = H_2N_2O_6 + 6H = H_2N_2O_3 + 3(H_2O) = N_2O_2 + H_2O + 3(H_2O) = 2(NO) + 4(H_2O)$. Diese Dämpfe von Stickstoffdioxyd (NO_2) sind eine der Schattenseiten dieser wegen ihrer Stärke vortrefflichen Kette; sie sind der Gesundheit schädlich und verderben die metallischen Apparate. Man muß die Kette deßhalb in einem gesonderten, zugigen Raume aufstellen oder sie fest verschließen. Beetz (1871) verschließt die Thoncylinder durch Serpentindeckel, in welche die Platinplatten durch ein Gemisch von Schwefel und Bimsteinpulver festgegossen werden; sechs solcher Elemente sind von einem cylindrischen Glasmantel umgeben, der einen Holzdeckel trägt, welcher in 2 concentrischen Kreisen sechs nach unten conisch erweiterte Löcher enthält; in den 6 äußeren schieben sich beim Aufdecken 6 auf den Zinkcylindern, in die 6 inneren 6 auf den Platinplatten befestigte Quecksilbernäpfe, deren Verbindung mittels eines sogenannten P a c h y t r o p s von außen hergestellt wird. Deckel und Fußbodenplatte können mittels einer Schraubenmutter, die sich um eine beide verbindende Eisenstange dreht, gegen einander und den Cylinder befestigt werden; in dem Raume um die Stange herum befindet sich ein mit eingebranntem Kalke gefülltes Ringgefäß, das die Säuredämpfe sofort absorbirt. Das Pachytrop besteht aus 7 gebogenen Drähten, welche zur Entfernung der Näpfe passen, und durch Drehung um eine Achse in dieselben gesenkt und wieder herausgehoben werden können. Mit einer solchen Einrichtung kann man stundenlang in einem Zimmer arbeiten, ohne durch Dämpfe belästigt zu werden. Eine weitere Schattenseite der Grove'schen Kette ist wegen der Kostbarkeit des Platins ihr hoher Preis. Hierin ist vortheilhafter

2. Bunsens Kette (1842). Zink taucht in Schwefelsäure und Kohle in Salpetersäure. Da man die Kohle leichter in großen, hohlen Cylindern anfertigen kann, so kommt hier meist die Salpetersäure in ein Glasgefäß, in dieses der Kohlencylinder, darein die, verdünnte Schwefelsäure und einen Zinkkolben enthaltende, Thonzelle. Die Constanz wird hier in derselben Weise wie bei Groves Kette bewirkt; die Störung durch Stickstoffdioxyd tritt auch hier auf. Die Kohlencylinder erhält man, indem man die passende Form mit einem Gemisch von 2 Theilen backender Steinkohle und 1 Theil Gaskohle in Pulverform füllt und mäßig glüht; dann werden sie in concentrirte Zuckerlösung getaucht, getrocknet und dann in Weißgluth gebracht. Die so erhaltene Kohle ist klingend, fest, gut leitend und steht in der Spannungsreihe noch hinter Platin, gibt also sehr starke Ketten. Der Nachtheil der Dämpfe ist vermieden in

Fig. 245.

3. Daniells Kette (1836). Zink taucht in Schwefelsäure und Kupfer in Kupfervitriollösung $CuSO_4$. Die Constanz erklärt sich folgendermaßen: Außer der Zersetzung des Wassers in O und H findet auch eine Zersetzung des Kupfervitriols statt in SO_4 und Cu, das Cu geht an das Kupfer; ein Atom O von SO_4, das nach dem Zn zugeht, vereinigt sich mit dem H zu Wasser, wodurch das H unschädlich wird, und das restirende SO_3 mit H_2O zu H_2SO_4, wodurch die Schwefelsäure, die das ZnO unschädlich gemacht hat, wiederhergestellt wird. Die Kette ist nicht so stark wie die vorgenannten; ihre elektrische Differenz ist nur $100 + 149 - 22 = 227$ gegen 405 bei Groves Kette; indessen ist sie stark genug für die meisten galvanischen Zwecke und hat deßhalb eine weit verbreitete Verwendung, da sie nicht so theuer wie Groves Kette und nicht schädlich ist und daher in Zimmern immer aufgestellt bleiben kann. Nach längerer Zeit schlägt sich auch auf der Thonzelle Kupfer nieder und schwächt die Wirkung; sie hat daher vielfache Abänderungen erfahren; eine der nützlichsten ist

4. Meidingers Kette (1859). Zink taucht in Bittersalzlösung, Kupfer oder Blei in Kupfervitriollösung, ohne poröse Scheidewand. Die gebräuchlichste Einrichtung derselben ist aus Fig. 245 zu ersehen. Auf dem Absatze bc des großen Glasgefäßes abcdi sitzt die

Zinkrolle; auf dem Boden a steht ein zweites, Kupfervitriollösung enthaltendes, kleines Glasgefäß, an dessen Wand die Kupfer- oder Bleirolle k angelehnt ist, von welcher ein mit Guttapercha überzogener Kupferdraht g als positiver Pol hinausgeht. Den Deckel des Ganzen bildet das Glasgefäß h i l, das ganz mit Kupfervitriolstücken gefüllt ist und mit seinem offenen unteren Ende l in das kleine Glasgefäß mündet, wodurch die Kupfervitriollösung immer concentrirt bleibt. Der übrige Raum des großen Glasgefäßes ist mit Bittersalzlösung gefüllt. Wenn die Kette ruhig steht, so diffundirt die schwerere Lösung so langsam in die leichtere nach oben, daß selbst nach Monaten das Zink noch keine Spur von Kupfer zeigt. Die Constanz dieser Kette dauert Jahre lang, doch ist ihre Kraft nicht groß. Die Mechaniker ziehen eine Bleirolle dem Kupfer vor, weil das abgeschiedene Kupfer von dem ersteren leichter zu trennen ist.

5. **Leclanché's Kette** (1868). Kohle in Braunstein in einer Thonzelle, ein Zinkstab in Salmiaklösung. Die Constanz wird dadurch erzielt, daß der Braunstein durch Abgabe von O den H zu Wasser oxydirt, während Salmiak und Zinkoxyd mit einander Chlorzink und Ammoniak bilden. Diese Kette wird als Jahre lang constant und zu gleicher Zeit von großer Stärke gerühmt; nach Müller in Freiburg (1870) ist ihre Stärke 0,896 von Daniells Kette.

6. Die letzten Jahre her wurden mancherlei neue Ketten aufgestellt: Zink und Kohle in Mercurosulfat (Marié-Davy); Zink in Salmiaklösung mit Kupfer in Kupfercarbonat (Ney); Zink in Kochsalzlösung mit Antimon in verdünnter Schwefelsäure (Böttger); Zink in Kochsalzlösung gegen Silberchlorid (Pincus). Sehr practisch ist die Buff-Bunsen'sche Kette: Zink und Kohle in einer Mischung von Schwefelsäure und einer Lösung von Kaliumdichromat. Die beiden Motoren sind an dem Deckel befestigt; das Zink kann an einem Messingstäbchen in die Höhe gezogen werden, dann ist die Kette außer Wirkung; läßt man das Zink wieder herab, so ist die Kette wieder hergestellt.

2. **Entstehung des elektrischen Stromes durch Temperaturunterschiede**, Thermoelektricität, Thermoströme. Seebeck (1821) löthete auf ein Wismuthstäbchen einen gebogenen Kupferstreifen so auf, daß ein geschlossener Rahmen entstand, innerhalb dessen auf einer Spitze eine Magnetnadel schwebte. Wurde das Rähmchen in den magnetischen Meridian gestellt und die nördliche Löthstelle durch eine Spiritusflamme erwärmt, so wurde die Nadel so abgelenkt, daß sich ihr Nordpol nach Osten richtete; hieraus folgte, daß durch die Erwärmung ein el. Strom entstanden war. Man nannte diesen Strom Thermostrom und die geschilderte Vorrichtung eine **thermoelektrische Kette**. Die Richtung des Stromes findet man, wenn man sich so in den Kupferstreifen gelegt denkt, daß man die Nadel sieht und den Nordpol zur Linken hat; dies ist der Fall, wenn man mit dem Kopfe nach Süden liegt; der positive Strom hat dann die Richtung von den Füßen zu dem Kopfe, also hier von Norden nach Süden. **Der Thermostrom geht also in der wärmeren Löthstelle vom Wismuth zum Kupfer, in der kälteren vom Kupfer zum Wismuth.** Erwärmt man die südliche Löthstelle, so wird der Nordpol nach Westen abgelenkt, der Strom hat also die umgekehrte Richtung, wodurch die eben ausgesprochene Regel bestätigt wird. Die Ablenkung der Nadel dauert so lange als die Temperaturdifferenz der Löthstellen. Die Thermoströme entstehen nicht blos bei der Berührung von Kupfer und Wismuth, sondern mit irgend zwei Metallen, wenn man sie zu einem Stromkreise verbindet und den Verbindungsstellen eine verschiedene Temperatur gibt, entweder durch Erwärmen oder Abkühlen einer Löthstelle; die Kraft des Stromes ist aber bei verschiedenen Verbindungen sehr verschieden. Seebeck hat die Metalle in eine thermoelektrische Spannungsreihe so geordnet, daß die el. Differenz um so größer ist, je weiter die Metalle in der Reihe aus einander stehen, und daß in der wärmeren Löthstelle der Strom immer von einem vorhergehenden zu einem folgenden Metall geht. Diese Spannungsreihe ist: Wismuth, Nickel, Kobalt, Platin, Kupfer, Blei, Zinn, Gold, Silber, Zink, Eisen, Arsen, Antimon. Für diese Reihe gilt dasselbe Gesetz wie für Voltas Spannungsreihe: die thermoel. Erregung irgend zweier Glieder ist gleich der Summe der Erregungen aller Zwischenglieder; sie ist also am stärksten zwischen Wismuth

496

und Antimon. Doch erreicht die Stärke einer Thermokette bei Weitem nicht die einer galvanischen Kette. So ist nach Pouillet die El. einer Wismuth-Argentan-Kette nur = 0,0059 einer Daniell'schen Kette. Für kleine Temperaturdifferenzen ist die el. Stärke der Differenz proportional; bei größeren wächst sie langsamer als diese; auch ändert sich die thermische Spannungsreihe bei hoher Temperatur. Man kann den Thermostrom verstärken, indem man mehrere Thermoketten zu einer Thermosäule verbindet.

Nobilis Thermosäule (1830) besteht aus 3—4cm langen Wismuth- und Antimonstäbchen, die so zusammengelöthet sind, daß alle geradzahligen Löthstellen auf der einen, alle ungeradzahligen auf der anderen Seite sich befinden, und daß sämmtliche Stäbe parallel liegend und durch eine isolirende Substanz getrennt, ein kleines Parallelepipedon bilden, das in ein Gehäuse von gleicher Form eingeschlossen ist und an diesem seine Pole hat; doch gibt es auch Thermosäulen, an denen die Löthstellen eine Linie bilden statt einer Ebene, lineare Thermosäulen, und andere Formen. Die Seiten der Löthstellen können durch Schieber abgesperrt werden; öfter findet man an ihnen Trichter, welche die Wärmestrahlen in größerer Menge zuleiten sollen. In Verbindung mit einem für Thermoströme geeigneten Multiplicator gibt die Thermosäule das feinste Thermometer, mit welchem man nach Melloni Temperaturdifferenzen von 1/5000° noch messen kann, und welches daher in der Wärmelehre von großer Wichtigkeit ist.

Wie sich die Stellung eines Metalls in der Spannungsreihe mit seiner Härte, Structur, Reinheit u. s. w. ändert, so nehmen auch die Legirungen ganz unberechenbare Stellen ein, ja zeigen meist, ebenso wie natürliche Schwefelmetalle, viel kräftigere thermoelektrische Wirkungen unter einander und mit den Metallen als die Metalle unter sich. Davon hat Marcus (1860) Anwendung gemacht zur Construction kräftiger Thermosäulen. Die eine Legirung besteht aus 10 Kupfer, 6 Zink und 6 Nickel, die andere aus 12 Antimon, 5 Zink und 1 Wismuth; ein solches Marcus'sches Element hat eine Kraft = 1/25 derjenigen eines Bunsen'schen Elementes. Mit einer Marcus'schen Batterie läßt sich eine Anzahl der schwächeren galvanischen Wirkungen zeigen. Sie besteht aus langen, unter einem Winkel zusammenstoßenden Doppelstäben, welche so an einander gelegt sind, daß man die Winkelstelle durch einen längeren Gasheerd erhitzen, die beiden Endstellen durch untergestellte mit Wasser gefüllte Tröge abkühlen kann.

Die Thermoelektricität zeigt sich auch schon mit einfacheren Vorrichtungen. Schon wenn man das eine Ende eines Multiplicatordrahtes bis zum Glühen erhitzt und dann mit diesem das andere Ende berührt, erfolgt eine Ablenkung der Magnetnadel; ebenso wenn man die Enden dieses Drahtes mit den Enden eines anderen zusammenlöthet und eine Löthstelle erhitzt; ebenso wenn man an die Enden eines Multiplicatordrahtes 2 Drähte löthet, den einen erhitzt und mit diesem den anderen berührt; der Strom geht in diesem Falle vom erhitzten zum kühlen Drahte. Wird ein Eisendraht zwischen zwei Kupferdrähte gelöthet, so zeigt diese Verbindung folgendes thermoelektrische Verhalten: die Stromstärke wächst, wenn die eine Löthstelle 0° warm ist, mit der Erwärmung der anderen bis zu 140°, fällt dann bis zu 300° Wärme, wächst dann abermals bei umgekehrter Stromrichtung.

Wie an Löthstellen durch Wärme El. entsteht, so kann umgekehrt an solchen durch El. Wärme oder Kälte hervorgerufen werden (Peltier 1834). Geht durch die eine Kugel eines Differentialthermometers ein Wismuth-Antimon-Stäbchen, so sinkt die Flüssigkeit auf der Seite dieser Kugel, wenn ein Strom vom Antimon zum Wismuth geht, was Erwärmung anzeigt; dagegen steigt die Flüssigkeit und zeigt Abkühlung an, wenn der Strom vom Wismuth zum Antimon geht. Peltiers Kreuz besteht aus einem Wismuthstabe und einem Antimonstabe, die sich unter rechtem Winkel kreuzen; von 2 verschiedenen Enden gehen Drähte um eine Nadel, an zwei andere gelangen Stromdrähte; wird der Strom geschlossen, so daß also durch die Kreuzungsstelle ein Strom geht, dann bewegt sich die Magnetnadel, zeigt bei einer Stromrichtung Erwärmung, bei der entgegengesetzten Abkühlung an. Quintus Icilius (1857) und Frankenheim (1858) fanden, daß die Temperaturänderung der Löthstelle der Intensität des erregenden Stromes proportional sei. Quintus Icilius leitete dabei den Strom durch 30 zu einer Thermosäule verbundene Antimon-Wismuth-Elemente; die unpaaren Löthstellen wurden dann stärker, die paarigen weniger stark erwärmt, als sie durch den galvanischen Strom an sich erwärmt würden; diese Differenzen mußten nun, als der erregende Strom unterbrochen wurde, selbst einen Thermostrom hervorrufen, aus dessen Wirkungen auf ein Galvanometer jenes Gesetz sich ergab. Frankenheim benutzte das Peltier'sche Kreuz in derselben Weise.

Die Thermosäulen liefern nur schwache Ströme, und auch die Batterieströme sind für Wirkungen im Großen nicht ausreichend, da es unmöglich ist, Batterien von Tausen-

den von Elementen in wirkungsgleichem Stande zu erhalten. Außerdem sind die kräftigsten Batterien nur für kurze Zeit constant, und die für längere Zeit constanten sind nicht kräftig. Endlich ist die Wartung und tägliche Ernährung der Batterien zeitraubend und kostspielig. Bei dieser Unzuverlässigkeit, Schwäche und Kostspieligkeit der galvanischen Batterien wäre eine andere Art der Erzeugung der elektrischen Ströme höchst wünschenswerth, besonders wenn es gelänge, Ströme von beliebiger Stärke zu gewinnen. Die täglich fortschreitende Verbesserung der magnet-elektrischen Maschinen läßt erwarten, daß dieses Ziel nicht mehr ferne liegt, daß man in Zukunft durch blose Umdrehung einer Maschine, ohne weitere Vorbereitung, in jedem Augenblick beliebig starke elektrische Ströme erzeugen kann, und daß auch die magnet-elektrischen Handmaschinen für den Kleingebrauch noch so billig werden, um sie für Schulversuche nutzbar zu machen. Näheres 532.

2. Stärke des elektrischen Stromes.

Galvanische Wirkungen, die zur Messung der Stromstärke benutzt werden, sind die Wirkung des Stromes auf eine Magnetnadel und die chemisch zersetzende Wirkung des Stromes; dieselben sind beide, aber nur in geringer Stärke, bei dem Strome der Influenzmaschine schon aufgetreten, können aber mittels der galvanischen Kette leichter und deutlicher erkannt werden. Die Wirkung auf die Magnetnadel ist in Oersteds Gesetze (1820) ausgesprochen: Geht ein el. Strom an einer Magnetnadel vorbei, so lenkt er die Magnetnadel aus dem magn. Meridian ab nach einer zur Stromrichtung senkrechten Richtung hin. Die Lage des Nordpoles bestimmt sich nach Ampères Schwimmerregel (1820): Man denkt sich in dem Schließungsbogen mit dem positiven Strome schwimmend, so daß man die Nadel sieht; dann hat man den Nordpol zur Linken. Die Stärke der ablenkenden Wirkung ist umgekehrt proportional dem senkrechten Abstande des Drehpunktes der Nadel vom Stromleiter (Biot-Savarts Gesetz 1820). Deutlicher und schon bei einem schwachen Strome erkennbar wird diese Ablenkung mit einer astatischen Doppelnadel, welche aus zwei ganz gleichen, in entgegengesetzter Richtung parallel mit einander verbundenen Nadeln besteht, die daher von dem Erdmagnetismus zwei ganz gleiche, aber entgegengesetzte Wirkungen erfahren, welche sich einander aufheben. Noch deutlicher wird die Wirkung, wenn der Schließungsdraht um die Nadel vielfach herumgeht, weil schon jeder der 4 Theile einer Windung in demselben Sinne auf die Nadel wirkt. Da die Wirkung auf die Nadel hierdurch vervielfacht wird, so nennt man eine mit Windungen versehene Nadel Multiplicator (Schweigger 1821). Eine zum Messen eingerichtete Verbindung einer leicht drehbar aufgehängten astatischen Nadel mit dem Multiplicator bildet das Galvanometer (Nobili 1830).

497

Das Oersted'sche und das Ampère'sche Gesetz werden mit Gestellen nachgewiesen, welche aus nach verschiedenen Richtungen gehenden Stäben zusammengesetzt sind, an denen freischwebende Magnetnadeln in verschiedenen Stellungen angebracht werden können, und an deren Enden durch Klemmschrauben die Enden der zwei von den Polen einer Batterie herkommenden Drähte, der sogenannten Poldrähte befestigt werden können. Gewöhnlich schaltet man in einen dieser Drähte einen Apparat ein, mittels dessen man den Strom leicht öffnen, schließen oder umkehren kann, einen Apparat, den man Stromunterbrecher, Stromwender, Gyrotrop nennt; dem Drehen dieses Apparates ist auch die Magnetnadel, immer nach den beiden Gesetzen gehorsam. Eine der einfachsten Constructionen (Fig. 246) besteht aus einem kleinen durch eine Kurbel drehbaren Holzcylinder, dessen beide Enden von Messingringen g und b umfaßt sind; von jedem Ringe geht eine abgerundete Messingnase bis in die Mitte des Cylinders an 2 sich diametral gegenüberliegende Stellen. Das Gestell dieses Cylinders besteht aus einem horizontalen und einem verticalen Brettchen; auf dem ersten sitzt eine Klemmschraube m, auf dem zweiten drei Klemmschrauben a, n, b, von denen Federn ausgehen; die Federn 2 und 4 schleifen auf den Ringen, die Feder 3, die in der Mitte sitzt, berührt entweder das Holz oder eine Nase. In die Klemme a wird der pos., in b der neg. Poldraht eingeschraubt; berührt nun die Feder 1 die Nase, so geht der pos. Strom von 2 auf 1 und m, und wenn zwischen diese und n ein Schließungs-

und Antimon. Doch erreicht die Stärke einer Thermokette bei Weitem nicht die einer galvanischen Kette. So ist nach Pouillet die El. einer Wismuth-Argentan-Kette nur = 0,0059 einer Daniell'schen Kette. Für kleine Temperaturdifferenzen ist die el. Stärke der Differenz proportional; bei größeren wächst sie langsamer als diese; auch ändert sich die thermische Spannungsreihe bei hoher Temperatur. Man kann den Thermostrom verstärken, indem man mehrere Thermoketten zu einer Thermosäule verbindet.

Nobilis Thermosäule (1830) besteht aus 3—4cm langen Wismuth- und Antimonstäbchen, die so zusammengelöthet sind, daß alle geradzahligen Löthstellen auf der einen, alle ungeradzahligen auf der anderen Seite sich befinden, und daß sämmtliche Stäbe parallel liegend und durch eine isolirende Substanz getrennt, ein kleines Parallelepipedon bilden, das in ein Gehäuse von gleicher Form eingeschlossen ist und an diesem seine Pole hat; doch gibt es auch Thermosäulen, an denen die Löthstellen eine Linie bilden statt einer Ebene, lineare Thermosäulen, und andere Formen. Die Seiten der Löthstellen können durch Schieber abgesperrt werden; öfter findet man an ihnen Trichter, welche die Wärmestrahlen in größerer Menge zuleiten sollen. In Verbindung mit einem für Thermoströme geeigneten Multiplicator gibt die Thermosäule das feinste Thermometer, mit welchem man nach Melloni Temperaturdifferenzen von 1/5000° noch messen kann, und welches daher in der Wärmelehre von großer Wichtigkeit ist.

Wie sich die Stellung eines Metalls in der Spannungsreihe mit seiner Härte, Structur, Reinheit u. s. w. ändert, so nehmen auch die Legirungen ganz unberechenbare Stellen ein, ja zeigen meist, ebenso wie natürliche Schwefelmetalle, viel kräftigere thermoelektrische Wirkungen unter einander und mit den Metallen als die Metalle unter sich. Davon hat Marcus (1860) Anwendung gemacht zur Construction kräftiger Thermosäulen. Die eine Legirung besteht aus 10 Kupfer, 6 Zink und 6 Nickel, die andere aus 12 Antimon, 5 Zink und 1 Wismuth; ein solches Marcus'sches Element hat eine Kraft = 1/25 derjenigen eines Bunsen'schen Elementes. Mit einer Marcus'schen Batterie läßt sich eine Anzahl der schwächeren galvanischen Wirkungen zeigen. Sie besteht aus langen, unter einem Winkel zusammenstoßenden Doppelstäben, welche so an einander gelegt sind, daß man die Winkelstelle durch einen längeren Gasheerd erhitzen, die beiden Endstellen durch untergestellte mit Wasser gefüllte Tröge abkühlen kann.

Die Thermoelektricität zeigt sich auch schon mit einfacheren Vorrichtungen. Schon wenn man das eine Ende eines Multiplicatordrahtes bis zum Glühen erhitzt und dann mit diesem das andere Ende berührt, erfolgt eine Ablenkung der Magnetnadel; ebenso wenn man die Enden dieses Drahtes mit den Enden eines anderen zusammenlöthet und eine Löthstelle erhitzt; ebenso wenn man an die Enden eines Multiplicatordrahtes 2 Drähte löthet, den einen erhitzt und mit diesem den anderen berührt; der Strom geht in diesem Falle vom erhitzten zum kühlen Drahte. Wird ein Eisendraht zwischen zwei Kupferdrähte gelöthet, so zeigt diese Verbindung folgendes thermoelektrische Verhalten: die Stromstärke wächst, wenn die eine Löthstelle 0° warm ist, mit der Erwärmung der anderen bis zu 140°, fällt dann bis zu 300° Wärme, wächst dann abermals bei umgekehrter Stromrichtung.

Wie an Löthstellen durch Wärme El. entsteht, so kann umgekehrt an solchen durch El. Wärme oder Kälte hervorgerufen werden (Peltier 1834). Geht durch die eine Kugel eines Differentialthermometers ein Wismuth-Antimon-Stäbchen, so sinkt die Flüssigkeit auf der Seite dieser Kugel, wenn ein Strom vom Antimon zum Wismuth geht, was Erwärmung anzeigt; dagegen steigt die Flüssigkeit und zeigt Abkühlung an, wenn der Strom vom Wismuth zum Antimon geht. Peltiers Kreuz besteht aus einem Wismuthstabe und einem Antimonstabe, die sich unter rechtem Winkel kreuzen; von 2 verschiedenen Enden gehen Drähte um eine Nadel, an zwei andere gelangen Stromdrähte; wird der Strom geschlossen, so daß also durch die Kreuzungsstelle ein Strom geht, dann bewegt sich die Magnetnadel, zeigt bei einer Stromrichtung Erwärmung, bei der entgegengesetzten Abkühlung an. Quintus Icilius (1857) und Frankenheim (1858) fanden, daß die Temperaturänderung der Löthstelle der Intensität des erregenden Stromes proportional sei. Quintus Icilius leitete dabei den Strom durch 30 zu einer Thermosäule verbundene Antimon-Wismuth-Elemente; die unpaaren Löthstellen wurden dann stärker, die paarigen weniger stark erwärmt, als sie durch den galvanischen Strom an sich erwärmt würden; diese Differenzen mußten nun, als der erregende Strom unterbrochen wurde, selbst einen Thermostrom hervorrufen, aus dessen Wirkungen auf ein Galvanometer jenes Gesetz sich ergab. Frankenheim benutzte das Peltier'sche Kreuz in derselben Weise.

Die Thermosäulen liefern nur schwache Ströme, und auch die Batterieströme sind für Wirkungen im Großen nicht ausreichend, da es unmöglich ist, Batterien von Tausen-

den von Elementen in wirkungsgleichem Stande zu erhalten. Außerdem sind die kräftigsten Batterien nur für kurze Zeit constant, und die für längere Zeit constanten sind nicht kräftig. Endlich ist die Wartung und tägliche Ernährung der Batterien zeitraubend und kostspielig. Bei dieser Unzuverlässigkeit, Schwäche und Kostspieligkeit der galvanischen Batterien wäre eine andere Art der Erzeugung der elektrischen Ströme höchst wünschenswerth, besonders wenn es gelänge, Ströme von beliebiger Stärke zu gewinnen. Die täglich fortschreitende Verbesserung der magnet-elektrischen Maschinen läßt erwarten, daß dieses Ziel nicht mehr ferne liegt, daß man in Zukunft durch blose Umdrehung einer Maschine, ohne weitere Vorbereitung, in jedem Augenblick beliebig starke elektrische Ströme erzeugen kann, und daß auch die magnet-elektrischen Handmaschinen für den Kleingebrauch noch so billig werden, um sie für Schulversuche nutzbar zu machen. Näheres 532.

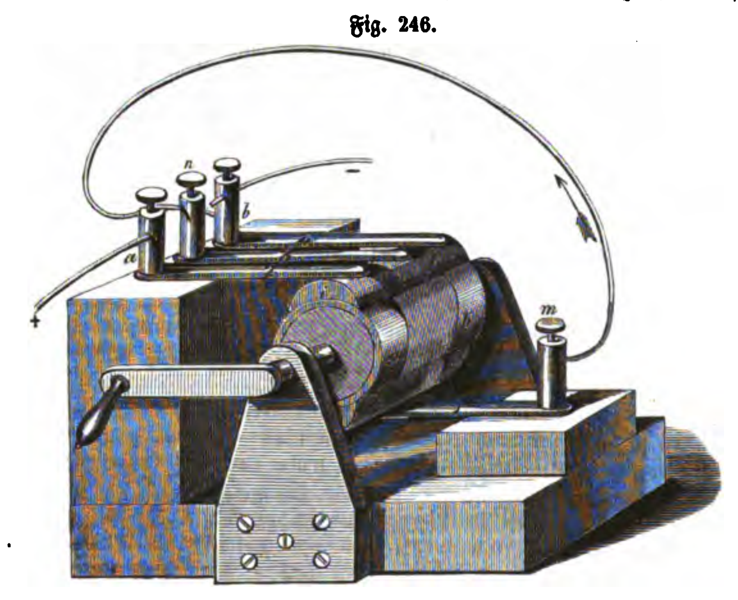
2. Stärke des elektrischen Stromes.

Galvanische Wirkungen, die zur Messung der Stromstärke benutzt werden, sind die Wirkung des Stromes auf eine Magnetnadel und die chemisch zersetzende Wirkung des Stromes; dieselben sind beide, aber nur in geringer Stärke, bei dem Strome der Influenzmaschine schon aufgetreten, können aber mittels der galvanischen Kette leichter und deutlicher erkannt werden. Die Wirkung auf die Magnetnadel ist in Oersteds Gesetze (1820) ausgesprochen: Geht ein el. Strom an einer Magnetnadel vorbei, so lenkt er die Magnetnadel aus dem magn. Meridian ab nach einer zur Stromrichtung senkrechten Richtung hin. Die Lage des Nordpoles bestimmt sich nach Ampères Schwimmerregel (1820): Man denkt sich in dem Schließungsbogen mit dem positiven Strome schwimmend, so daß man die Nadel sieht; dann hat man den Nordpol zur Linken. Die Stärke der ablenkenden Wirkung ist umgekehrt proportional dem senkrechten Abstande des Drehpunktes der Nadel vom Stromleiter (Biot-Savarts Gesetz 1820). Deutlicher und schon bei einem schwachen Strome erkennbar wird diese Ablenkung mit einer astatischen Doppelnadel, welche aus zwei ganz gleichen, in entgegengesetzter Richtung parallel mit einander verbundenen Nadeln besteht, die daher von dem Erdmagnetismus zwei ganz gleiche, aber entgegengesetzte Wirkungen erfahren, welche sich einander aufheben. Noch deutlicher wird die Wirkung, wenn der Schließungsdraht um die Nadel vielfach herumgeht, weil schon jeder der 4 Theile einer Windung in demselben Sinne auf die Nadel wirkt. Da die Wirkung auf die Nadel hierdurch vervielfacht wird, so nennt man eine mit Windungen versehene Nadel Multiplicator (Schweigger 1821). Eine zum Messen eingerichtete Verbindung einer leicht drehbar aufgehängten astatischen Nadel mit dem Multiplicator bildet das Galvanometer (Nobili 1830). 497

Das Oersted'sche und das Ampère'sche Gesetz werden mit Gestellen nachgewiesen, welche aus nach verschiedenen Richtungen gehenden Stäben zusammengesetzt sind, an denen freischwebende Magnetnadeln in verschiedenen Stellungen angebracht werden können, und an deren Enden durch Klemmschrauben die Enden der zwei von den Polen einer Batterie herkommenden Drähte, der sogenannten Poldrähte befestigt werden können. Gewöhnlich schaltet man in einen dieser Drähte einen Apparat ein, mittels dessen man den Strom leicht öffnen, schließen oder umkehren kann, einen Apparat, den man Stromunterbrecher, Stromwender, Gyrotrop nennt; dem Drehen dieses Apparates ist auch die Magnetnadel, immer nach den beiden Gesetzen gehorsam. Eine der einfachsten Constructionen (Fig. 246) besteht aus einem kleinen durch eine Kurbel drehbaren Holzcylinder, dessen beide Enden von Messingringen g und b umfaßt sind; von jedem Ringe geht eine abgerundete Messingnase bis in die Mitte des Cylinders an 2 sich diametral gegenüberliegende Stellen. Das Gestell dieses Cylinders besteht aus einem horizontalen und einem verticalen Brettchen; auf dem ersten sitzt eine Klemmschraube m, auf dem zweiten drei Klemmschrauben a, n, b, von denen Federn ausgehen; die Federn 2 und 4 schleifen auf den Ringen, die Feder 3, die in der Mitte sitzt, berührt entweder das Holz oder eine Nase. In die Klemme a wird der pos., in b der neg. Poldraht eingeschraubt; berührt nun die Feder 1 die Nase, so geht der pos. Strom von 2 auf 1 und m, und wenn zwischen diese und n ein Schließungs-

draht eingeschaltet ist, so durchläuft der pos. Strom diesen in der Richtung m n und geht über 3, f und 4 zu b. Dreht man aber die Kurbel, bis die Feder 3 auf dem Holze schleift, so ist der Strom unterbrochen; dreht man sie endlich halb herum, so schleift jetzt die Feder 3 auf k, der Strom hat demnach jetzt die Richtung n m, also die umgekehrte Richtung.

Fig. 246.



Das Biot-Savart'sche Gesetz wurde mittels der Schwingungsmethode aufgefunden; doch läßt sich dasselbe auch aus dem allgemeinen Grundgesetze für alle anziehenden und abstoßenden Naturkräfte ableiten, welches Laplace für diesen Fall folgendermaßen ausdrückt: die Kraft, mit der jedes Element des Leiters auf den Magnetpol wirkt, ist umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes des Poles vom Element. Ampère gibt diese Ableitung in folgender Weise: a b und a_1 b_1 seien zwei parallele, unendlich lange Ströme und m ein Magnetpol; zieht man nun zwei Grade mcc_1 und mdd_1 von m an die Ströme a b und a_1 b_1, welche nur einen sehr kleinen $\angle cmd$ mit einander bilden, so ist die Wirkung der hierdurch abgeschnittenen Stromelemente cd und c_1 d_1 auf den Pol diesen Längen direct und nach dem Grundgesetze umgekehrt proportional den Quadraten der Abstände; diese Kräfte verhalten sich also wie $(cd : cm^2) : (c_1 d_1 : c_1 m^2)$. Nun ist $\triangle cmd \sim c_1 md_1$, also ist $cd : cm = c_1 d_1 : c_1 m$; sind ferner die senkrechten Abstände des Poles von den Strömen $= a$ und a_1, so ist auch $cm : c_1 m = a : a_1$. Durch Einführung dieser Werthe in das Kraftverhältniß ergibt sich dieses $= a_1 : a$, womit Biot-Savarts Gesetz bewiesen ist. Da umgekehrt dieses Gesetz durch die Versuche nach der Schwingungsmethode feststeht, so folgt aus seiner Geltung auch die des Laplace'schen Grundgesetzes.

Die Wirkung einer Windung des Stromes um eine Nadel herum erfährt man leicht, wenn man sich eine Nadel und ein Rechteck um dieselbe zeichnet und sich in diesem den Stromlauf denkt; geht der positive Strom oben von rechts nach links, so geht er links von oben nach unten, unten von links nach rechts und rechts von unten nach oben. Zu dem ersten Theile der Windung hat man sich den Schwimmer mit dem Rücken nach oben, mit den Füßen rechts vorzustellen: sein linker Arm tritt dann aus der Zeichenfläche nach dem Beschauer zu, dorthin richtet sich also auch der Nordpol; in dem zweiten Theile steht der Schwimmer auf dem Kopfe, das Gesicht nach rechts, der linke Arm und der Nordpol treten also abermals heraus; in dem dritten Theile liegt der Schwimmer auf dem Rücken mit den Füßen nach links, der linke Arm und der Nordpol treten wieder heraus; in dem vierten Theile steht der Schwimmer aufrecht, das Gesicht nach links; der linke Arm tritt auch hier aus der Zeichenfläche nach vorn. Also wirken alle 4 Theile einer Windung in derselben Weise, eine Windung hat schon einen größeren Effect, als ein vorbeigeführter Draht. Wenn nun viele Windungen möglichst nahe und auf einander liegen, so wirken sie alle in gleicher Weise, wenn sie durch das Umwinden nicht zu weit von der Nadel wegkommen.

Demnach muß der Draht möglichst fein und die zur Isolirung der Windungen von einander nothwendige Ueberspinnung des Drahtes mit Seide möglichst dünn sein. Die Dünne des Drahtes ist freilich durch andere, später zu besprechende Verhältnisse beschränkt. Weil die schwache Thermoelektricität in einem Drahte von geringer Leitungsfähigkeit stark geschwächt und so unwirksam würde, so darf ein Thermomultiplicator nur aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes bestehen, was später erhellen wird. — Die astatische Doppelnadel erfährt keinen Einfluß vom Erdmagnetismus, weil auf jeder Seite derselben sich zwei entgegengesetzte Pole befinden, von denen der eine vom Nordpole der Erde gerade so stark angezogen als der andere abgestoßen wird, vorausgesetzt, daß der Magnetismus der beiden Nadeln genau gleich groß ist. Da dies nur sehr schwer, ja mit absoluter Genauigkeit gar nicht zu erreichen ist, so wird eine astatische Nadel wohl immer noch eine gewisse Richtkraft haben; diese ist aber bei guten Nadeln so gering, daß auch ein schwacher Strom das Uebergewicht gewinnt und bei Anwendung des Multiplicators die Nadel senkrecht stellt. Natürlich dürfen sich die beiden Theile einer Nadel nicht auf derselben Seite des Multiplicators befinden, sonst würde die Wirkung desselben auf die beiden eine entgegengesetzte und beinahe gleich große sein und demnach sich selbst aufheben. Wird aber der eine Theil der Nadel in das Innere der Windungen gebracht und der andere außen gelassen, so ist die entgegengesetzte Wirkung auf die entgegengesetzte äußere Nadel der Richtung nach dieselbe wie auf die innere Nadel, so daß die beiden Einflüsse sich abermals verstärken.

498 **Die elektrische Wasserzersetzung** (Carlisle 1800) ist die zweite galvanische Wirkung, die zur Strommessung benutzt wird. Der verbreitetste Wasserzersetzungsapparat besteht aus einem trichterförmigen Gefäße, von einem Ständer getragen, durch dessen Boden 2 entweder in das Glas eingeschmolzene oder in einem Korkpfropfen steckende Platindrähte gehen, die mit vertical aufrecht stehenden Platinblechen endigen und von Klemmschrauben herkommen. Ueber diesen Platinblechen hängen an federnden Klemmen des Ständers zwei oben geschlossene graduirte Glasröhren, wie das Gefäß mit Wasser gefüllt, über die Platinbleche gestülpt und nach der Methode der pneumatischen Wanne in das Gefäßwasser getaucht. Werden nun die Klemmschrauben mit einer Batterie verbunden, so werden die Platinbleche zu Polen derselben, und beim Schließen des Stromes zeigen sich Gasströme an den Platinblechen, die in den Glasröhren aufsteigen und dieselben allmälig füllen; am negativen Pole sammelt sich doppelt so viel Gas als am positiven; nimmt man die Gläschen nach der Füllung heraus, so zeigt sich das erstere Gas durch sein Verbrennen als Wasserstoff, das letztere durch das Aufflammen eines glimmenden Spanes als Sauerstoff; das Wasser wird also in seine zwei Bestandtheile, Wasserstoff und Sauerstoff in demselben Volumverhältnisse zerlegt, wie sie sich mit einander zu Wasser verbinden, und wie sie mit einander gemengt Knallgas bilden. Würde man die beiden Pole in ein Gefäß gebracht haben, so hätte man in demselben das Gasgemenge Knallgas erhalten.

499 **Galvanische Meßapparate.** 1. Das Voltameter (Jacobi 1839). Da die durch das Wasser fließende El. das Wasser zersetzt, da sie um so mehr Wasser zersetzt, je länger derselbe Strom dauert, und da die zersetzten Wassermengen bei gleich bleibender Stromstärke proportional mit der Zeit, also auch mit der Elektricitätsmenge zunehmen, und da endlich nach Faradays Untersuchungen die chemische Wirksamkeit gleichen Schritt hält mit der magnetischen, so ist die Quantität eines in einer bestimmten Zeit zersetzten Wasserquantums ein Maß für die Menge der in dieser Zeit herbeigeflossenen El., ein Maß für die Stromstärke. Die Menge des zersetzten Wassers aber wird erkannt aus der Menge des entstandenen Gases; da indeß hierbei die Scheidung der Gase nur störend ist, so gibt man einem Wasserzersetzungsapparat eine solche Einrichtung, daß sich beide Gase, also Knallgas, in einem Meßgefäße sammeln; diese Einrichtung ist das Voltameter. Als Einheit der Stromstärke hat Jacobi denjenigen Strom vorgeschlagen, der in 1 Minute 1^{ccm} Knallgas bei 0^{0} Temperatur und 760^{mm} Luftdruck erzeugt.

Das Voltameter besteht aus einem Glasgefäße mit einem Bleipfropfen, durch welchen in Glasröhrchen wohl isolirt zwei Kupferdrähte zu zwei möglichst nahe beisammen stehen-

den größeren Platinlamellen gehen. Das Gefäß wird mit Schwefelsäure gefüllt, da dieselbe ein viel besserer Leiter als Wasser ist und doch Wasser genug enthält; dann werden die beiden Kupferdrähte mit den beiden Poldrähten verbunden. Das Wasser wird nun zersetzt, und das entstandene Knallgas steigt durch eine im Bleipfropfen befestigte Glasröhre in ein nach dem Princip der pneumatischen Wanne aufgestelltes, genau graduirtes Glasgefäß; man merkt sich die Zeit des Beginnens der Zersetzung und läßt dieselbe bis zu einer bestimmten Füllung weiter gehen; dann unterbricht man sie, merkt sich wieder die Zeit, sowie die Temperatur t und den Barometerstand b. Ist das Volumen des in n Minuten entstandenen Knallgases $= v^{ccm}$, so ist die Stromstärke $= vb : (760 (1+0{,}003665t)n)$. So leicht die Benutzung des Voltameters ist, so eignet es sich doch nicht zu allgemeiner Messung, weil die Flüssigkeit der Stromleitung einen bedeutenden Widerstand entgegensetzt, der einen Theil des Stromes aufzehrt, so daß bei geringen Stromstärken gar keine Zersetzung stattfindet und stärkere Ströme immer eine zu kleine Maßbestimmung erfahren. Genauer sind die magnetischen Meßapparate.

2. Die Tangentenboussole (Pouillet 1837) besteht aus einem an einer Stelle aufgeschnittenen Kupferringe von etwa 3^{dm} Durchmesser, der vertical so auf einem Dreifuße befestigt ist, daß die Schnittenden mit Klemmschrauben in Verbindung stehen, welche die Poldrähte aufzunehmen bestimmt sind und so einen Strom durch den Kupferring leiten. In der Mitte des Ringes befindet sich eine Kreistheilung, deren Mittelpunkt mit dem des Ringes zusammenfällt, und über welcher auf einer Spitze oder besser an einem Coconfaden eine Magnetnadel schwebt. Wird der Ring in die Ebene des magnetischen Meridians gestellt, so wird von einem durch den Ring gehenden Strome die Nadel abgelenkt; die Ablenkung ist um so größer, je stärker der Strom ist, und zwar bilden die Stromstärke und die Ablenkung folgendes Gesetz: die Stromstärke ist direct proportional der Tangente des Ablenkungswinkels.

Beweis. Auf die Nadel wirken zwei Kräfte, der Erdmagnetismus m und die Stromstärke e; die erste Kraft sucht die Nadel in den Meridian zurückzudrehen, die zweite sucht sie in eine zum Meridian senkrechte Richtung zu stellen; die Nadel kommt zur Ruhe, wenn die Ablenkung α so groß ist, daß die drehenden Wirkungen, die Drehungsmomente der beiden Kräfte einander gleich sind. Die Kräfte können aber nicht mit ihren ganzen Beträgen m und e auf die Nadel wirken, sondern nur mit den Componenten derselben, die auf der Nadel senkrecht stehen. Da nun m im Meridian wirkt, so ist eine zur Nadel senkrechte Componente die Gegenkathete des Winkels α, folglich $= m \sin \alpha$. Die Stromstärke wirkt in einer zum Meridian senkrechten Richtung, folglich steht eine zur Nadel senkrecht gefällte Linie dem Winkel $90 - \alpha$ gegenüber; folglich ist diese Componente $= e \sin (90 - \alpha) = e \cos \alpha$. Die Drehungsmomente dieser Componenten sind durch Multiplication derselben mit der halben Nadellänge zu erhalten; folglich ist $\frac{1}{2}l \, . \, e \cos \alpha = \frac{1}{2}l \, . \, m \sin \alpha$, woraus $e = m \, . \, \tan \alpha$, womit das Gesetz bewiesen ist. Bei der Ableitung dieses Gesetzes wird vorausgesetzt, daß die Stromwirkung auf die abgelenkte Nadel dieselbe sei, wie auf die nicht abgelenkte; da aber die magnetischen Theilchen in beiden Fällen eine ganz verschiedene Lage haben, so trifft diese Voraussetzung nicht zu, und es gilt daher das Gesetz nur genau für kleine Ablenkungen und kleine Nadeln; die Nadeln müssen 5 mal kleiner als der Ring des Durchmessers sein; und um die kleinen Ablenkungen genau messen zu können, ist eine Gauß'sche Spiegelablesung von Poggendorff angebracht. Genaue Resultate gibt Wiedemanns Tangentenboussole (1854). Dieselbe besteht aus einer kurzen, dicken Kupferhülse, in welcher statt einer Nadel ein dicker, magnetisirter Stahlspiegel schwebt, dessen Stellung ebenfalls durch Fernrohr und Skala beobachtet wird; zu beiden Seiten der Hülse sind auf Schlitten verschiebbare Drahtspiralen angebracht, die bis über die Hülse geschoben werden können. Durch diese seitliche Aufstellung des Stromes gegen die Magnetnadel wird der Fehler der Tangentenboussole vermieden, wie Helmholtz (1849) gezeigt hat; denn wenn sich alsdann die Nadel dreht, so entfernt sich ihre eine Hälfte von dem Stromkreise, während sich die andere nähert. Nach Gaugain ist die Tangente des Ablenkungswinkels am genauesten der Stromstärke proportional, wenn der Abstand der Nadelmitte von der Ringmitte ¼ des Ringdurchmessers beträgt; hierauf beruht Gaugains Tangentenboussole (1853), in welcher sich die Nadel in der eben angegebenen Stellung gegen den Ring befindet.

3. Die Sinusboussole (Pouillet 1837) enthält einen drehbaren Stromkreis, mit welchem man bei dem Versuche der durch den Strom abgelenkten Nadel so lange nachgeht, bis Nadel und Strom in einer Ebene liegen. Die Stromstärke ist dann proportional dem Sinus des Ablenkungswinkels.

Denn weil der Stromring und die Nadel in einer Ebene liegen, so steht die ablenkende Kraft des Stromes schon senkrecht auf der Nadel, fällt also mit ihrer senkrechten Componente zusammen; folglich ist jetzt das Drehungsmoment des Ringes $= \frac{1}{2}l \cdot e$; da dieses gleich dem des Erdmagnetismus, $= \frac{1}{2}l \cdot m \sin\alpha$ ist, so ergibt sich $e = m \sin\alpha$. Poggendorff hat mancherlei Verbesserungen an der Sinusboussole angebracht, namentlich dadurch, daß die Nadel an einen Coconfaden gehängt wurde. Siemens und Halske haben derselben durch solide Construction eine für telegraphische Zwecke geeignete transportable Einrichtung gegeben, und durch Anbringen zweier Theilungen, innerhalb und außerhalb des Nadelkreises sie auch als Tangentenboussole brauchbar gemacht; man nennt diese Einrichtung **Sinus-Tangentenboussole.**

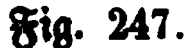
4. Das **Galvanometer** dient eigentlich nicht zum Messen der Stromstärke, sondern zur Nachweisung der Existenz sehr schwacher Ströme. Indessen kann es auch gerade zur Messung schwacher Ströme benutzt werden, da seine Wirkung ja mit der der Tangentenboussole übereinstimmt. Doch ist nur innerhalb der ersten 10 bis 20 Grade die Stromstärke der Tangente der Ablenkung proportional; für größere Ablenkungen muß der Galvanometerkreis auf praktische Weise durch Anwendung von der Stärke nach bekannten Strömen graduirt werden. Ein zu Messungen besonders geeignetes Galvanometer hat Buff (1853) construirt; dasselbe hat an 20 000 Windungen eines Kupferdrahtes von 0,168^{mm} Dicke, die auf einen cylindrischen Rahmen von 60^{mm} Länge und 25^{mm} Durchmesser gezogen sind, in dem eine Nadel von 5^{mm} Länge und 2,5^{mm} Breite schwebt; parallel mit derselben spielt auf der Gradeintheilung ein nicht magnetischer Zeiger. Dieses Galvanometer kann vollständig als Tangentenboussole benutzt werden.

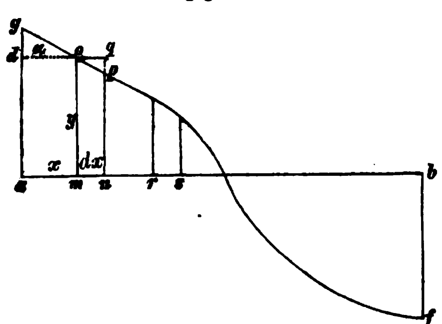
Die magnetischen Meßinstrumente sind den chemischen weit vorzuziehen; sie sind nicht blos empfindlicher, sondern sie geben auch die Stromstärke in einem bestimmten Moment, während das Voltameter nur die durchschnittliche Stromstärke während der Zersetzungszeit gibt. Nur geben sie die Stromstärke nicht in einer leicht definirbaren Einheit; indessen kann man z. B. die Angaben der Tangentenboussole in chemischem Maße ausdrücken. Es seien i und A zwei in chemischem Maße ausgedrückte Stromstärken, welche an der Tangentenboussole die Ablenkungen α und 45° hervorrufen, so ist $i : A = \tan g\alpha : \tan g\, 45^0 = \tan g\alpha : 1$; hieraus $i = A \tan g\alpha$. Um also eine Stromstärke in chemischem Maße auszudrücken, die an der Boussole die Ablenkung α erzeugt, muß man die Tangente dieser Ablenkung mit einem für den betreffenden Apparat constanten Factor A, der sogenannten **Reductionsconstante**, multipliciren. Um aber diese Constante zu finden, benutzt man ebenfalls die Gleichung $i = A \tan g\alpha$, aus welcher $A = i : \tan g\alpha$. Man setzt in einen und denselben Stromkreis ein Voltameter und eine Tangentenboussole, die erstere gibt in der in 1 Minute entwickelten Gasmenge den Zähler i, die letztere die Ablenkung α, aus denen dann A zu berechnen ist.

Das Ohm'sche Gesetz (1827). **Die Stromstärke ist direct proportional der elektromotorischen Kraft der Kette, und umgekehrt proportional dem Widerstande des Stromkreises. Der Widerstand des Stromkreises ist direct proportional seiner Länge und dem specifischen Leitungswiderstande seines Stoffes, und umgekehrt proportional seinem Querschnitte.** 500

Beweis. Unter Stromstärke an einer bestimmten Stelle eines Stromkreises versteht man die Elektricitätsmenge, die an dieser Stelle in der Zeiteinheit durch den Querschnitt fließt, vorausgesetzt, daß der Stromkreis in einem stationären Zustande sei, daß also durch jeden Querschnitt eine gleiche Menge von El. fließe, daß an dem einen Pole eine gewisse Menge freier pos. El. e, an dem anderen Pole eine gleiche Menge freier neg. El. — e sei, welche gegen einander abfließen. Dieses Abfließen ist aber nur möglich, wenn eine Stelle größerer Dichtigkeit sich neben einer Stelle geringerer Dichte befindet, wenn also die el. Dichte von beiden Polen nach der Mitte des Schließungsbogens hin abnimmt. Es sei ab Fig. 247 ein Stromkreis, a und b seine beiden Pole; die freien El. seien als senkrechte Ordinaten y an den betreffenden Stellen des Stromkreises aufgetragen, und die Endpunkte der Ordinaten durch eine zusammenhängende Curve gf verbunden, so stellt diese den Verlauf der freien El. in dem Leiter dar. Die Neigung dieser Curve über einem gewissen Punkte m, der um die Abscisse x von dem pos. Pole a entfernt ist, stellt die Abnahme der el. Dichte von diesem Punkte m zu dem nächsten Punkte n vor, das el. Gefälle, wie

Ohm jene Abnahme nennt. Das Gefälle ist um so größer, je größer die Linie pq im Verhältnisse zu oq, je größer also das Verhältniß pq : oq d. i. die trigonometrische Tangente des Winkels poq ist. Bezeichnen wir die kleinen Stücke der Abscisse x und der Ordinate y durch dx und dy, so ist das Gefälle ausgedrückt durch dy : dx. Da nun die Annahme berechtigt ist, daß die durch das unendlich klein gedachte Stückchen mn fließende Elektricitätsmenge, die Stromstärke oder Intensität i, dem Gefälle proportional ist, so können wir setzen: $i = C\,(dy : dx)$, worin C eine von den Umständen bedingte Größe bedeutet, die wir folgendermaßen finden. Wir bezeichnen die El., welche in der Zeiteinheit durch die Flächeneinheit des Querschnittes mit dem Gefälle 1 fließt, mit k, und setzen diese Werthe in obige Gleichung, wobei wir bedenken, daß i durch einen anderen Querschnitt q fließt und daher = kq ist; die Gl. heißt deßhalb $kq = C$. Setzen wir in den Werth für i diesen Werth für C ein, so entsteht $\mathbf{i = kq\ (dy : dx)}$. Fassen wir nun zwei andere eben so nahe bei einander stehende Querschnitte r und s des Leiters ins Auge, so ergibt sich für diese $i' = kq\,(dy' : dx)$, weil dx, die Entfernung der Querschnitte, q der Querschnitt selbst und k die durch die Einheit des Querschnittes fließende El. dieselben bleiben. Nun soll aber durch alle Querschnitte gleich viel El. fließen, i soll = i' sein, also muß auch $dy : dx = dy' : dx$ sein, die trigonometrische Tangente des Neigungswinkels der einzelnen Curvenelemente muß dieselbe Größe beibehalten. Dies ist nur der Fall in der geraden Linie. Die Gefällcurve ist eine gerade Linie. Sei der Neigungswinkel derselben gegen ab gleich α, so ist $\tan \alpha = gd : od = (e - y) : x$. Hieraus $y = e - x \tan \alpha$. Wenn hier statt x die ganze Länge l des Leiters gesetzt wird, dann ist y die am Endpunkte b dieser Länge vorhandene Dichte $= -e$; Einsetzung in die letzte Gl. ergibt $-e = e - l \tan \alpha$ oder $\tan \alpha = 2e : l$. Substituiren wir diesen Werth für dy : dx in den obigen (fett gedruckten) Werth für i, so ist $i = kq \,.\, 2e : l = 2e : (l : kq)$. Der Divisor $(l : kq)$ bezieht sich auf den Stromkreis; er gibt an, daß die Stromstärke in umgekehrtem Verhältnisse steht zur Länge des Stromkreises und in geradem Verhältnisse zum Querschnitte und zur Größe k. Dieser Einfluß des Stromkreises auf die Stromstärke kann kein verstärkender sein, weil der Stromkreis ja den Strom nur leitet und nicht erzeugt; sondern dieser Einfluß muß ein schwächender sein und zwar einfach dadurch, daß der Strom einen Theil seiner Kraft verbraucht, um sich seinen Weg im Stromkreise zu bahnen. Dieser schwächende Einfluß heißt der Widerstand des Stromkreises; bezeichnen wir denselben mit W, so ist $i = 2e : W$, womit der erste Satz bewiesen ist. Ist in der Formel für diesen Widerstand $W = l : kq$ sowohl l als auch $q = 1$, so hängt der bleibende Ausdruck $1 : k$ nur noch von der Stoffeigenthümlichkeit ab; er ist der specifische Leitungswiderstand eines Stoffes, wie auch daraus hervorgeht, daß k die Menge der durch die Querschnittseinheit fließenden El. bedeutet und daß der specifische Leitungswiderstand mit dieser Menge in reciprokem Verhältnisse stehen muß. Bezeichnen wir diesen specifischen Leitungswiderstand mit r und setzen in den Ausdruck für W statt k seinen Werth 1 : r, so ist $W = lr : q$, womit der zweite Satz bewiesen ist.


Fig. 247.

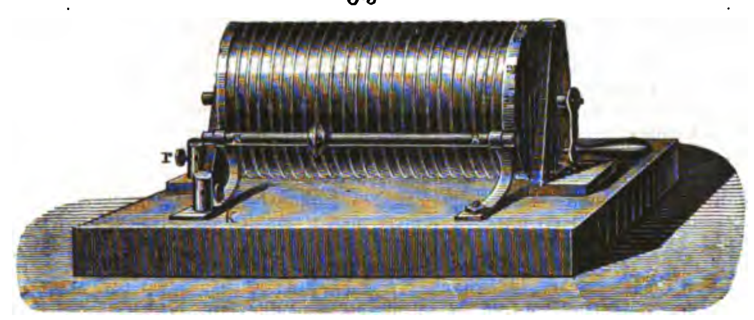


Der Widerstand W des Stromkreises besteht aber bei einer galvanischen Kette aus 2 Theilen, dem Widerstande im Schließungsbogen und dem Widerstande in der Kette selbst, da ja in dieser der Strom seinen Weg durch die Flüssigkeit zu nehmen hat. Ist der Schließungsbogen ein gleichmäßiger Draht, so ist sein Widerstand $= lr : q$; wenn nun der Widerstand der Kette = w ist, so beträgt der Gesammtwiderstand $w + lr : q$ und der mathematische Ausdruck des Ohm'schen Gesetzes ist demnach für eine galvanische Kette $i = e : (w + lr : q)$. Häufig sucht man den Widerstand der Kette ebenfalls in der zweiten Form darzustellen; man denkt sich einen Draht vom Querschnitte q (gewöhnlich 1^{qmm}) und dem spec. Leitungswiderstande r (gewöhnlich = 1) und von solcher Länge, daß sein Widerstand dem der Kette gleich ist; diese Drahtlänge, welche denselben Widerstand wie ein anderer Leiter darbietet, nennt man die reducirte Länge des Leiters. Hat man den Widerstand der Kette in dieser Weise reducirt und bezeichnet l die Summe der Länge des Schließungsbogens und der reducirten Länge, so ist einfach $i = e : (lr : q)$. Ebenso gilt diese Form, wenn der Widerstand der Kette gegen den des Bogens verschwindet, wie es z. B. in der

Thermokette der Fall ist. Der Factor 2 im Zähler kann wegbleiben, wenn wir feststellen, daß e die von der ganzen Kette gelieferte El. bedeuten soll.

501 **Nachweis des Ohm'schen Gesetzes.** Man kann hierbei einige Apparate benutzen, mittels deren man Widerstände in eine Leitung einschalten kann. Solche Apparate sind: 1. Der Rheostat (Fig. 248) von Jacobi (1841) und Wheatstone (1843). Auf einer dreh-

Fig. 248.



baren Walze von Holz, Serpentin oder Marmor liegt in schwach eingeschnittenen Schraubenwindungen ein Neusilberdraht, dessen eines Ende isolirt an der Walze befestigt ist, während das andere zu der einen Klemme r geht. Neben der Walze liegt horizontal ein Messingstab ss, auf dem lose eine Rolle sitzt, die mit ihrem gekehlten Rande in eine Drahtwindung greift und durch die Drehung der Walze sich auf dem Stabe hin- und herschraubt. Der Strom geht vom ersten Poldrahte über die genannte Klemme durch soviele Drahtwindungen, als bis zur Rolle vorhanden sind, und geht durch die Rolle und das Stäbchen zur zweiten Klemme k und zum zweiten Poldrahte. Die Zahl der eingeschalteten Windungen kann an einer Theilung des Stäbchens, und Bruchtheile einer Windung können an einer Kreistheilung der einen Stirnfläche der Walze abgelesen werden. Mehr geeignet für genaue Messungen ist Poggendorffs (1841) Rheochord: Die Klemmen befinden sich an 2 neben einander liegenden kupfernen Lagern; von diesen gehen Platindrähte aus durch ein verschiebbares mit Quecksilber gefülltes Kästchen zu 2 Seidenfäden, die über Rollen geführt durch angehängte Gewichte die Platindrähte spannen. Unter den Drähten befindet sich ein in mm getheiltes Lineal, an dem man mittels eines am Quecksilberkästchen befestigten Nonius genaue Ablesungen machen kann. Der Strom geht von der einen Klemme zu dem einen Platindrahte nnd durch das Quecksilberkästchen zu dem anderen Pladindrahte auf die andere Klemme. Kann man mittels dieses Apparates nur kleinere Widerstände einschalten, so erlaubt Eisenlohrs (1845?) Widerstandsäule Einschaltungen bis zu 12 000 Windungen des Wheatstone'schen Rheostatendrahtes. Auf einer aufrechten Holzsäule befinden sich in immer zunehmenden Entfernungen von einander, parallel zu einander befestigt, mehrere Messingringe, die durch kleine drehbare Messingbrücken leitend mit einander verbunden werden können. Sind alle die Brücken geschlossen, so geht der Strom einfach durch alle Brücken und Messingringe von der oberen Klemme zur unteren, also durch eine kurze Leitung. Sind aber alle Brücken geöffnet, so muß der Strom durch einen feinen Argentandraht von 0,01″ Dicke gehen, der in immer wachsenden Längen in die Vertiefung zwischen den Messingringen eingewunden ist. Durch Schließen einer oder mehrerer Brücken kann man Theile des Drahtes ausschalten.

Ohm selbst führte den Nachweis seines Gesetzes an einer Thermokette, deren Enden in schmelzendes Eis und siedendes Wasser getaucht waren, eine Methode, welche eine directe Bestätigung der einzelnen Gesetzestheile ermöglicht. Schaltet man in den Schließungsbogen einer solchen Kette eine gewisse Anzahl von Windungen des Rheostaten und eine Tangentenboussole ein, und macht man dann den Draht 2, 3, 4 . . . mal länger, so ergibt sich, daß die Tangente des Ablenkungswinkels 2, 3, 4 . . mal kleiner wird, womit der Einfluß der Länge bewiesen ist. Schaltet man in jedem einzelnen Falle einen Draht vom doppelten Durchschnitte und derselben Länge ein, so wird die Tangente des Ablenkungswinkels 2 mal größer, womit die Wirkung des Querschnittes dargethan ist. Je dicker also ein Draht ist, desto geringer ist sein Leitungswiderstand, und zwar wird der Widerstand 4, 9, 16 . . . mal kleiner, wenn die Dicke 2, 3, 4 . . . mal größer wird; wenn dagegen die Länge 2, 3, 4 . . . mal größer wird, so wird der Widerstand 2, 3, 4 . . . mal stärker, also ein ganz verschiedenes Verhalten der Länge und der Dicke. Der Leitungswiderstand der Erde als eines

unendlich dicken Drahtes müßte hiernach = Null sein. Eine sehr verdienstvolle Bestätigung des Ohm'schen Gesetzes für die Galvani'sche Kette lieferte Fechner (1831), die um so verdienstvoller ist, als er weder eine constante Kette, noch eine Tangentenboussole benutzen konnte. Wollen wir dieselbe anwenden, so können wir die allgemeinere Geltung des Gesetzes folgendermaßen nachweisen: Man bestimmt zuerst die Stromstärke in chemischem Maße nach der Formel $i = A \tang \alpha$; da dieses nun bekannte i, wenn noch kein Draht eingeschaltet ist, $= e : w$, so kann man hieraus w durch e ausdrücken. Nun schaltet man zuerst einen Draht von der Länge l, dem Querschnitte q und dem Leitungswiderstande r ein, so findet eine andere Ablenkung in der Boussole statt, mittels welcher man die Stromintensität findet $i' = A \tang \beta$. Da dieses nun bekannte $i' = e : (w + rl : q)$, so kann man wieder w durch e ausdrücken. Wird nun ein anderer Draht von der Länge l', dem Querschnitte q' und dem Leitungswiderstande r eingeschaltet, so kann man abermals mittels der 2 Gl. $i'' = A \tang \gamma$ und $i'' = e : (w + rl' : q')$ den Kettenwiderstand w durch e ausdrücken. Man findet dann, wieviel verschiedene Versuche man auch anstellt, für w immer denselben Werth, woraus hervorgeht, daß im Ohm'schen Gesetze der Einfluß der Länge und des Querschnittes richtig aufgefaßt ist. Um auch den Einfluß der elektromotorischen Kraft und des Kettenwiderstandes zu erkennen, verbindet man n Bunsen'sche Elemente mit einander und schaltet die Tangentenboussole mit ihren dicken, kurzen Enddrähten direct ein. Die elektromotorische Kraft ist jetzt ne, der Kettenwiderstand aber ebenfalls n mal so groß geworden = nw, während der Widerstand des Schließungsbogens gegen nw verschwindet. Es ist daher jetzt $i = ne : nw = e : w$, gleich der Intensität einer einzigen Kette. Diese Folgerung bewährt die Tangentenboussole und damit auch die übrigen Theile des Gesetzes. Schaltet man noch Drähte, zuerst l, dann $l + l' + l''$ . . . . ein, so findet man $i' = ne : (nw + rl : q)$, dann $i'' = ne : (nw + rl : q + rl' : q'$ u. s. w.) immer in Uebereinstimmung mit der Angabe der Tangentenboussole, eine wiederholte Bestätigung aller Theile des Gesetzes.

502 **Zwölf Folgerungen aus dem Ohm'schen Gesetze.** 1. Die Intensität des galvanischen Stromes ist in allen Stellen seiner Leitung dieselbe.

Diese Folgerung liegt in dem Beweise des Ohm'schen Gesetzes; es wurde dort gezeigt, daß die Intensitätscurve eine gerade Linie, daß das Gefälle an allen Stellen der Leitung dasselbe ist. Nachgewiesen wurde der Satz schon von Barlow (1825) dadurch, daß eine Magnetnadel an allen Stellen der Leitung dieselbe Ablenkung erfuhr. Fechner (1831) zeigte, daß selbst in eingeschalteten flüssigen Säulen die Stromstärke dieselbe ist.

2. Die Menge der freien Elektricität auf dem Leiter nimmt von den beiden Polen nach der Mitte zu stetig ab und ist in der Mitte gleich Null. Wird der eine Pol ableitend berührt, so erhält die freie Elektricität des anderen Poles die doppelte Dichte, und diese Elektricität geht dann in stetiger Abnahme bis zu dem ersten Pole. Wird irgend eine Stelle des Leiters ableitend berührt, so wird die Dichte dieser Stelle gleich Null, zu beiden Seiten in gleichen Abständen sind gleiche, aber entgegengesetzte Dichten, und am gleichnamigen Pole wird die Elektricität um die Dichte der berührten Stelle vermindert, am ungleichnamigen Pole um denselben Betrag vermehrt.

Alle diese Sätze folgen daraus, daß die Gefällcurve (Fig. 247) eine Gerade ist, welche an beiden Enden um $+ e$ und $- e$ von der Mittellinie entfernt ist; die einzelnen Ordinaten, welche die freie El. darstellen, nehmen von $+ e$ und $- e$ an gleichmäßig ab, sind in der Mitte gleich Null und zu beiden Seiten, gleichweit von der Mitte entfernt, gleich groß, aber entgegengesetzt. Das Gefälle bleibt nun dasselbe, wenn auch eine ableitende Berührung eintritt, folglich bleiben auch die el. Differenzen dieselben. Die Differenz der Pole war vor der Berührung $e - (- e) = 2e$, also ist sie nach der Berührung auch noch 2e. Ist demnach die Dichte an einem Pole 0, so ist sie am anderen 2e, und nimmt von da bis zu 0 am anderen Pole ab. Wird eine andere Stelle ableitend berührt, z. B. in $1/4$ der Länge des Leiters, so wird deren Dichte Null, zu beiden Seiten dieses Punktes nimmt sie in entgegengesetzter Art zu, ist am nächsten Pole $= 1/2 e$, daher am entfernten $3/2 e$. Kohlrausch hat (1849) diese Sätze bestätigt durch Versuche mit seinem genauen Condensator und seiner empfindlichen Drehwage.

3. Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr kleinem Widerstande läßt sich die Stromstärke durch Vermehrung der Elemente nicht vergrößern.

Der Widerstand des Schließungsbogens, der sogenannte äußere Widerstand sei mit w', der Widerstand der Kette, der innere oder wesentliche Widerstand mit w bezeichnet, so ist Ohms Gesetz $i = e : (w + w')$, woraus, da w' gegen w verschwindet, $i = e : w$. Werden nun statt eines Elementes n angewandt, so wird die elektromotorische Kraft = ne, der

wesentliche Widerstand = nw, während w′ bleibt; also ist $i' = ne : (nw + w')$. Da nun w′ sehr klein sein soll, so verschwindet es gegen nw, daher ist $i' = ne : nw = e : w$, also $i = i'$. Die Stromintensität nimmt in diesem Falle nicht zu, wenn man statt einer Kette eine Batterie nimmt. Der Nachweis ist sehr leicht mit der Boussole zu führen.

4. **Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr kleinem Widerstande wächst die Stromstärke mit der Vergrößerung der elektromotorischen Platten.**

An sich ist die elektromotorische Kraft nach den galvanischen Grundversuchen unabhängig von der Größe der sich berührenden Flächen. Verbindet man also sämmtliche Zinkplatten einer Bunsen'schen Kette mit einander und ebenso sämmtliche Kohlenplatten, so bleibt e dasselbe, aber w wird n mal kleiner, weil der Querschnitt der durchströmten Flüssigkeit n mal größer wird; folglich ist jetzt $i' = e : (w : n + w')$ und, wenn w′ verschwindend klein ist, $i' = e : (w : n) = en : w$. Da nun in demselben Falle $i = e : w$, so ist $i' = ni$, d. h. die Stromstärke wird durch nfache Vergrößerung der Platten n mal größer, wenn der äußere Widerstand verschwindet. Bei der magnetisirenden Wirkung des Galvanismus wird ein kurzer, dicker Schließungsdraht angewendet; folglich wendet man hier eine Batterie mit großen, aber wenigen Elementen an.

5. **Durch Vergrößerung der Platten kann die Stromintensität jedoch nicht bis ins Unendliche gesteigert werden.**

Denn der Zähler des Ausdruckes $i' = e : (w : n + w')$ bleibt bei der Vergrößerung der Platten ungeändert; in dem Nenner aber wird der erste Summand w : n immer kleiner, je größer n wird und verschwindet endlich gegen w′; die größte Intensität also, die durch Vergrößerung der Platten möglich ist, ist $= e : w'$.

6. **Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr großem Widerstande wächst die Stromstärke mit Vermehrung der Elemente.**

Für ein Element gilt die Formel $i = e : (w + w')$, für n Elemente $i' = ne : (nw + w')$. Ist nun nw gegen w′ sehr klein, so ist $i = e : w'$ und $i' = ne : w'$, folglich ist $i' = ni$. Ist also der wesentliche Widerstand verschwindend gegen den äußeren, so wächst die Stromintensität mit der Zahl der Elemente.

7. **Durch Vermehrung der Elemente kann die Stromintensität jedoch nicht ins Unendliche gesteigert werden.**

Denn die Formel $i' = ne : (nw + w')$ läßt sich auch so schreiben: $i' = e : (w + w' : n)$. Wenn in diesem Ausdrucke n größer wird, so bleibt der Zähler unverändert, und in dem Nenner wird der zweite Summand w′ : n immer kleiner und verschwindet endlich gegen w; folglich ist die höchste durch die Vermehrung der Elemente zu erreichende Intensität $= e : w$.

8. **Bei Anwendung eines Schließungsbogens von sehr großem Widerstande wächst die Stromstärke nicht durch Vergrößerung der Platten.**

Wieder ist für ein Element $i = e : w'$. Werden nun n Zinkplatten mit einander verbunden und ebenso n Kohlenplatten, so wird e nicht größer, wohl aber wird w jetzt n mal kleiner; folglich $i' = e : (w : n + w') = ne : (w + nw')$. Da nun w gegen nw′ noch eher verschwindet, so ist $i' = ne : nw' = e : w'$; folglich ist $i' = i$. Die Vergrößerung der Platten hat also bei großen äußeren Widerständen, wie bei chemischen und physiologischen Versuchen und bei dem Telegraphen, keinen Einfluß auf die Stromintensität, dagegen wirkt die Zahl der Elemente verstärkend auf dieselbe ein. Man nimmt also in solchen Fällen viele, aber kleine Elemente.

9. **Das Maximum der Stromstärke wird erreicht, wenn der innere Widerstand dem äußeren gleich ist, wenn der wesentliche Widerstand gleich dem des Schließungsbogens ist.**

Beweis. Angenommen, es würden von einer Batterie von n Elementen je x Platten zu einer verbunden, so sind nur noch n : x Elemente vorhanden, und die elektromotorische Kraft ist daher $(n : x)\,e$. Der wesentliche Widerstand eines Elementes, der vorher w war, ist jetzt w : x, daher ist er in allen Elementen $= nw : x^2$; ist der äußere Widerstand w′, so ist demnach $i = (n : x)\,e : [(nw : x^2) + w'] = ne : [(nw : x) + w'x]$ und $i^2 = n^2e^2 : [(nw : x) + w'x]^2$. Dieser Bruch wird ein Maximum, wenn der Nenner ein Minimum wird; dem Nenner aber kann man die Form geben: $4\,nww' + [(nw : x) - w'x]^2$, aus welcher Form ersichtlich ist, daß ein Minimum eintritt, wenn $(nw : x) - w'x = 0$, d. h. wenn $nw : x^2 = w'$.

10. **Das Maximum der Stromstärke ist $e/_2 \sqrt{(n : ww')}$, und die Zahl der in 1 zu vereinigenden Elemente ist $x = \sqrt{(nw : w')}$.**

Beweis. In dem eben betrachteten Nenner von i^2 ist für den Fall des Maximums der 2te Summand = 0, also $i^2 = n^2e^2 : 4nww'$, woraus $i = ne : 2\sqrt{(nww')} = e/_2 \sqrt{(n : nww')}$. Ebenso ergibt die Bedingung $nw : x^2 = w'$ des Maximums für x den Werth $\sqrt{(nw : w')}$.

11. Ist ein neu eingeschalteter Widerstand im Verhältnisse zum ursprünglichen groß, so sinkt die Stromstärke bedeutend, im entgegengesetzten Falle aber nur wenig.

Die Intensität $i = e : w$ wird durch den neuen Widerstand w' nun $i' = e : (w + w')$, so daß $i : i' = (w + w') : w = [1 + (w' : w)] : 1$; dies letztere Verhältniß ist aber um so größer, je größer $w' : w$.

12. Ist ein Multiplicator in einen Stromkreis von geringem Widerstande eingeschaltet, so muß er aus einer beschränkten Zahl von Windungen dicken Kupferdrahtes bestehen; ist jedoch außer dem Multiplicator ein großer Widerstand vorhanden, so muß er aus vielen Windungen feinen Drahtes bestehen.

Beweis. Die drehende Einwirkung einer Stromwindung wächst mit der Stromstärke, also mit $e : (w + w')$, worin w den Widerstand in einem um die Nadel gehenden Kupferringe und w' den übrigen Widerstand bedeutet. Wird nun dieser Ring in einen Draht von $n$facher Länge und daher $n$mal kleinerem Querschnitte verwandelt, so wird aus diesen Gründen die Stromstärke $i = e : (wn^2 + w')$. Dieser Draht bildet jedoch n Windungen um die Nadel; daher ist das Drehungsmoment proportional zu $ne : (wn^2 + w')$ oder zu $e : [wn + (w' : n)]$. Das Quadrat dieses Ausdrucks ist $e^2 : [wn + (w' : n)]^2$. Den Nenner desselben kann man auf die Form bringen: $4ww' + [wn - (w' : n)]^2$. Dieser Nenner aber wird ein Minimum, wenn $wn = w' : n$, oder wenn $w' = wn^2$. Wenn jedoch der Nenner ein Minimum wird, so wird der Werth des Bruches, die drehende Wirkung des Stromes, ein Maximum. Dieser Fall tritt also ein, wenn wn^2, der Widerstand des Multiplicators, gleich dem übrigen Widerstande ist. Ist also wie in einer Thermosäule, der Widerstand im Stromkreise klein, so muß auch der des Multiplicators gering sein; ist aber, wie bei physiologischen Versuchen, der Widerstand im Stromkreise groß, so muß auch der des Multiplicators groß sein.

503 **Stromverzweigungen** (Ohm 1827, Kirchhoff 1849). Man kennt die electromotorische Kraft e einer Kette, sowie die Längen, die Querschnitte und die specifischen Leitungswiderstände von Drähten, die sich von dem Schließungsdrahte abzweigen und wieder mit demselben vereinigen; man soll die Stromstärke in den Zweigen wie in dem Hauptdrahte bestimmen. Der einfachste Fall besteht darin, daß mehrere Drähte von einem Punkte des Hauptdrahtes ausgehen und sich wieder in einem Punkte vereinigen. Für diesen Fall ergibt sich das Gesetz: der Stromantheil, der einen Zweig durchfließt, steht im geraden Verhältnisse zu dem Product der reducirten Längen der gleichzeitig mit ihm durchströmten Leiter.

Es mögen die auf die Einheit des Querschnittes und des Leitungswiderstandes reducirten Längen der Zweigdrähte $= l^1$, l^2 und l^3 sein, so kann man sich statt derselben auch Drähte von der Länge 1 denken, die denselben Widerstand leisten; dies ist aber nur möglich, wenn dieselben die Querschnitte $(1 : l_1)$, $(1 : l_2)$ und $(1 : l_3)$ haben. Da nun diese 3 Drähte dieselbe Wirkung haben, wie ein Draht von der Summe dieser 3 Querschnitte, so müßte dieser Draht den Querschnitt haben $(1 : l_1) + (1 : l_2) + (1 : l_3) = l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3 : l_1 l_2 l_3$. Würde man diesen Draht an die Stelle jener 3 setzen, so würde seine Intensität $= i$, gleich der Intensität im Hauptdrahte sein, und die Intensitäten i_1, i_2 und i_3 in den Zweigdrähten müßten sich demnach zu i wie die Querschnitte verhalten. Hieraus ergeben sich die Intensitäten in den drei Zweigen $i_1 = i . l_1 l_2 l_3 : l_1 (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) = i . l_2 l_3 : (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$, ebenso $i_2 = i . l_1 l_3 : (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$ und $i_3 = i . l_1 l_2 : (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$, woraus sofort das oben ausgesprochene Gesetz folgt. Um die Intensität im Hauptdrahte zu finden, muß zuerst der Widerstand in den Zweigdrähten bestimmt werden. Da dieser Widerstand gerade so groß ist, wie der des gedachten Drahtes von dem spec. Widerstande 1 und dem Querschnitte $(l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) : l_1 l_2 l_3$, so ist dieser Widerstand $= l_1 l_2 l_3 : (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)$. Ist nun der Widerstand im Hauptdrahte und der Kette $= w$, so ist $i = e : [w + l_1 l_2 l_3 : (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3)] = e (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) : [w (l_1 l_2 + l_1 l_3 + l_2 l_3) + l_1 l_2 l_3]$. Durch Substitution dieses Werthes in die 3 Zweigintensitäten kann man auch diese durch die gegebenen Größen ausdrücken.

Die zahlreichen Aufgaben, welche die Stromverzweigung darbietet, lassen sich auch mittels zweier von Kirchhoff durch höhere mathematische Behandlung aufgefundenen Grundgesetze lösen; 1. Die Summe der Stromstärken in allen denjenigen Drähten, die in einem Punkte zusammenstoßen, ist gleich Null. 2. Die Summe der Producte der Stromstärken und der Widerstände aller eine geschlossene Figur bilden-

den Drähte ist gleich der Summe aller in dem betreffenden Stromkreise vorhandenen elektromotorischen Kräfte.

Eine nicht unwichtige Anwendung finden diese Sätze auf die Intensität in der Wheatstone'schen Schleife. In eine Drahtleitung ist eine lange Raute mit ihren spitzen Enden eingeschaltet, während im Mittelpunkte ein Galvanometer steht, dessen Draht zu den stumpfen Enden geht. Der Widerstand im ungetheilten Drahte sei w, in den 4 Seiten der Raute $= l_1, l_2, l_3, l_4$, in der kurzen Diagonale l_5; ebenso seien die Stromstärken, $i \ldots . i_5$, so ist nach Kirchhoffs erstem Gesetze $i = i_1 + i_3$, $i = i_2 + i_4$, $i_5 = i_1 - i_2$, $i_5 = i_4 - i_3$. Nach dem zweiten Gesetze ist $i_5 l_5 = i_3 l_3 - i_1 l_1$ und $i_5 l_5 = i_2 l_2 - i_4 l_4$. Aus den 4 ersten Gl. folgt $i_3 = i_4 - i_5$; $i_1 = i - i_3 = i - i_4 + i_5$; $i_2 = i - i_4$. Setzt man diese Werthe in die 2 letzten Gl. ein, so ergibt sich $i_5 l_5 = l_3 (i_4 - i_5) - l_1 (i - i_4 + i_5)$ und $i_5 l_5 = l_2 (i - i_4) - i_4 l_4$ oder $i_5 l_5 + i_5 l_3 + i l_1 + i_5 l_1 + i_5 l_1 = i_4 (l_3 + l_1)$ und $- i_5 l_5 + i l_2 = i_4 (l_2 + l_4)$. Aus diesen 2 Gl. folgt endlich die Intensität im Galvanometerdrahte $i_5 = i (l_2 l_3 - l_1 l_4) : [l_5 (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) + (l_1 + l_3)(l_2 + l_4)]$. Wenn der Strom im Galvanometer 0 ist, so folgt $l_2 l_3 = l_1 l_4$ oder $l_3 = l_1 l_4 : l_2$.

Der specifische Leitungswiderstand. Um die Leitungswiderstände verschiedener Körper messen, vergleichen zu können, bedarf es einer Widerstandseinheit. Leider sind verschiedene Widerstandseinheiten aufgestellt. Jacobi (1848) nahm denjenigen Widerstand als Einheit, den ein Kupferdraht von 1^m Länge und 1^{mm} Durchmesser dem elektrischen Strome entgegensetzt. Siemens (1849) schlug als Widerstandseinheit den Widerstand eines Quecksilberprismas von 1^m Länge und 1^{mm} Dm. bei 0° C. vor. Nach Langsdorff (1853) ist es jedoch am leichtesten, Drähte von chemisch reinem Silber immer von gleichem Widerstande zu erhalten. Da außerdem Silber den geringsten Leitungswiderstand hat, so ist in der letzten Zeit die Silbereinheit häufig angewendet worden. Der als Widerstandseinheit gewählte Draht wird Normaldraht genannt; wird ein anderer Widerstand in Normaldrahtlänge verwandelt, d. h. wird angegeben, welche Länge Normaldraht jenem Widerstande gleich sei, so heißt diese Länge die reducirte Länge. Die Methoden zur Bestimmung des Widerstandes fester Körper sind: die Substitutionsmethode, die Compensationsmethode und die Wheatstone'sche Schleife. **504**

Die Substitutionsmethode besteht darin, daß man zuerst den zu messenden Widerstand zusammen mit einer Boussole in den Stromkreis einer Kette einschaltet, die Ablenkung beobachtet, und dann an der Stelle des Widerstandes den Rheostaten einschaltet und so lange dreht, bis die Ablenkung wieder dieselbe ist. Man erfährt dann, wie vielen Windungen des Rheostaten der unbekannte Widerstand gleich ist, und da man im Voraus bestimmt hat, wie viel Normaldraht einer Windung des Rheostaten entspricht, so kann man auch den Widerstand in Normaldraht ausdrücken. Die Compensationsmethode besteht darin, daß man mit Hilfe einer Sinusboussole die Stromstärken vergleicht, welche eine und dieselbe Batterie in zwei Stromkreisen erzeugt, von denen der eine einen bekannten Widerstand hat, der andere aber den unbekannten Widerstand enthält. Gesetzt bei Einschaltung des Rheostaten sei die Ablenkung α und bei Einschaltung des Widerstandes α', so verhalten sich die Stromstärken $i : i' = \sin \alpha : \sin \alpha'$. Es sei nun der Widerstand des Rheostaten $= r$, der unbekannte Widerstand $= x$, der der Kette w, so ist auch $i : i' = [e : (w + r)] : [e : (w + x)] = (w + x) : (w + r)$. Durch Verbindung der 2 Gl. erfolgt $\sin \alpha : \sin \alpha' = (w + x) : (w + r)$, woraus $x = (w + r) \sin \alpha : \sin \alpha' - w$. — Auch bei Anwendung der Wheatstone'schen Schleife wird ein Rheostat eingeschaltet, und zwar in die eine Rautenseite, während in die andere der unbekannte Widerstand eingeschaltet wird. Stand anfänglich das Galvanometer auf Null, so dreht man nach den Einschaltungen so lange am Rheostat, bis abermals die Nullstellung erreicht ist; dann ist der unbekannte Widerstand gleich dem des Rheostaten. Doch ist diese Methode nur für kleine Widerstände anwendbar. Um sie für größere anzuwenden, schaltet man in die eine Rautenseite den unbekannten Widerstand, in die anderen dagegen veränderliche ablesbare Widerstände ein, wie das Rheochord oder die Widerstandsäule und verändert dieselben so lange, bis die Ablenkung = 0 ist. Dann ist nach der Theorie der Schleife (503.) der unbekannte Widerstand gleich dem Product der 2 in den anderen stumpfen Winkel eingeschalteten Widerstände, dividirt durch den Widerstand in demselben stumpfen Winkel, in dem der unbekannte Widerstand sitzt. — Nach solchen Methoden fand man, wenn der Leitungswiderstand des Kupfers = 1 gesetzt wird, den des Silbers = 0,73, des Goldes = 0,97, des Messings = 3,57, des Platins = 4,54, des Eisens = 5,88, des Neusilbers = 15,47, des Quecksilbers = 38,46. Um den Leitungs-

widerstand einer Flüssigkeit zu bestimmen, schließt man dieselbe in eine Meßröhre ein, zwischen den mit Platin bekleideten Boden und einen ebenfalls mit Platin bekleideten verschiebbaren Kolben, dessen Verschiebung genau gemessen werden kann. Diese Meßröhre wird mit der Widerstandsäule, dem Rheostat und einem Galvanometer zusammen in einen Stromkreis eingeschaltet. Dann wird der Stempel etwas zurückgezogen und der leer gewordene Theil mit Flüssigkeit erfüllt; das Galvanometer geht hierdurch etwas zurück, so viel als der Leitungswiderstand der zugefüllten Flüssigkeit ausmacht. Man verringert nun den Widerstand mittels der Widerstandsäule und am Rheostat so lange, bis der Galvanometerstand wieder hergestellt ist. Die Länge des ausgeschalteten Drahtes gibt den Widerstand an. So fand man den Widerstand von Schwefelsäure von 1,1 bis 1,4 sp. G. = 938 500 bis 1 023 400, von gesättigter Kochsalzlösung = 3 173 000, von gesättigter Kupfervitriollösung = 18 450 000, von käuflicher Salpetersäure = 1 606 000, wobei die Silbereinheit angenommen ist. Man sieht hieraus, wie groß der Widerstand der Flüssigkeiten ist im Verhältnisse zu dem der festen Körper; der Widerstand des menschlichen Körpers = 90 000 Jacobi'schen Einheiten, vorausgesetzt noch, daß man die Hände in gesäuertes Wasser taucht.

Bei den festen Körpern gibt man gewöhnlich die Leitungsfähigkeit an, welche dem Leitungswiderstande reciprok ist; man multiplicirt indeß, um nicht zu kleine Zahlen zu erhalten, den reciproken Werth mit 100, setzt also die Leitungsfähigkeit des Silbers = 100. Dann ist nach Matthiessen (1857) die von Kupfer = 77, Gold 56, Natrium 37, Aluminium 34, Zink 27, Eisen 14, Zinn 11, Platin 11, Blei 8, Neusilber 8, Wismuth 1, Graphit 0,07, Gaskohle 0,04. Die Tafeln der verschiedenen Forscher sind ungleich, weil die chemische Reinheit einen großen Einfluß hat; außerdem treten Veränderungen durch Spannung, Härte, Dichtigkeit und Temperatur ein. Die Spannung scheint die Leitung zu vermindern, größere Dichtigkeit dieselbe bald zu vermindern, bald zu vermehren; die Leitung des Kupfers wird durch Härten und Anlassen vermindert, die anderer Metalle durch Anlassung vermehrt. Die Leitungsfähigkeit nimmt bei steigender Temperatur ab; so steigt der Leitungswiderstand von Eisendraht von 690 bei 21° bis 4880 bei der Weißgluth. Wiedemann fand, daß der Leitungswiderstand von Kupfervitriollösung bei einer Temperaturerhöhung von 55° um die Hälfte abnimmt, also ein umgekehrtes Verhalten. Es wird angegeben, daß bei unzersetzbaren Leitern die Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur ab-, bei zersetzbaren aber zunimmt. Besonders gering ist die Leitungsfähigkeit des Wassers; nach Pouillet soll sie nur 0,0025 von der der concentrirten Kupfervitriollösung sein.

505 **Die Constanten eines galvanischen Elementes.** Zur Berechnung der Stromstärke bedarf man außer dem Leitungswiderstande nach dem Ohm'schen Gesetze noch der elektromotorischen Kraft und des wesentlichen Widerstandes; man nennt diese Größen gegenüber dem veränderlichen Widerstande des Schließungsbogens die Constanten der Kette. Zur Bestimmung derselben gibt es mehrere Methoden: 1. Die Ohm'sche Methode (1830), 2. die Poggendorff'sche Compensationsmethode (1845), 3. die Vergleichungsmethode, 4. die Siemens'sche directe Widerstandsmessung (1874).

Nach Ohm schaltet man eine Kette mit einer Boussole und einem Rheochord ein, in welchem der Schlitten auf 0 steht; kennt man die Reductionsconstante, so findet man aus der Ablenkung die Stromstärke i in chemischem Maße; da diese nun auch $i = e : w$, so ist $e = iw$. Nun schaltet man einen bestimmten Widerstand w^1 des Rheochord ein, bestimmt abermals aus der entstehenden Ablenkung die Stromstärke $i^1 = e : (w + w^1)$, so hat man $e = i^1 (w + w^1)$. Aus den 2 Gl. für e ergibt sich der wesentliche Widerstand $w = i^1 w^1 (i - i^1)$ und die elektromotorische Kraft $e = i i^1 w^1 : (i - i^1)$. Diese Methode eignet sich nur für constante Ketten, da inconstante sich zwischen den zwei Versuchen ändern. Für solche, wie auch für constante Ketten ist Poggendorffs Compensationsmethode geeignet. Dieselbe benutzt eine constante Kette, deren Constanten nach Ohms Methode schon bestimmt sind, und verbindet dieselbe mit der zu untersuchenden Kette durch eine Stromverzweigung, deren Wirkung nach Ohms oder Kirchhoffs Gesetzen berechnet werden kann und so die elektromotorische Kraft und dadurch auch den Widerstand ergibt (s. Aufg. 786 und 787). — Von den zahlreichen Vergleichungsmethoden sei Fechners Methode (1830) erwähnt. Die zu vergleichenden Elemente werden zugleich hinter einander in den Stromkreis eingeschaltet, einmal so, daß die von beiden erzeugten Ströme gleich gerichtet sind, sich also summiren, dann so, daß sie entgegengesetzt gerichtet sind, sich also subtrahiren. Die Stromstärken in beiden Fällen seien i und i', die elektromotorischen Kräfte e und e', und der Widerstand des ganzen Stromkreises $= w$, so ist $i = (e + e') : w$, $i' = (e - e') : w$; hieraus $e = \frac{1}{2} w (i + i')$ und $e' = \frac{1}{2} w (i - i') = e (i - i') : (i + i')$. — Kennt man einmal die Constanten eines Elementes, so kann man dessen Stromstärke nach Ohms und Kirchhoffs Gesetzen für jede Combination berechnen.

506 **Berechnung der Stromstärke aus den Constanten.** Nach Untersuchungen von Müller ist der Widerstand eines Zink-Kohlen-Elementes je nach dem Gehalte an Schwefelsäure = 6 — 30 Silbereinheiten, der Widerstand des Daniell'schen 12 bis 25; ebenso ergibt sich nach Müller die elektromotorische Kraft eines Daniell'schen Elementes = 520, wobei als Einheit der elektromotorischen Kraft diejenige angenommen wird, welche in einem Stromkreise von der Einheit des Widerstandes (1 Silbereinheit) in 1 Minute 1^{ccm} Knallgas entwickelt. Die elektromotorische Kraft des Daniell'schen Elementes kann also in 1 Minute 520^{ccm} Knallgas erzeugen, vorausgesetzt, daß sie nur die Einheit des Widerstandes zu überwinden hat. Da diese Voraussetzung nicht zutrifft, sondern in dem Elemente selbst ein Widerstand von 12—15 Einheiten zu überwinden ist, wozu noch der äußere, ebenfalls in Silbereinheiten auszudrückende Widerstand kommt, so ist die Leistung in Wirklichkeit viel geringer. Um den äußeren Widerstand auf Silbereinheiten zu reduciren, muß man die in 504. angegebene Leitungsfähigkeit mit 100 dividiren und dann reciprok nehmen, wodurch man den specifischen Leitungswiderstand in Silbereinheiten erhält; diesen muß man nach dem Ohm'schen Gesetze mit der Länge des betreffenden Widerstandes in Metern multipliciren und mit dem Querschnitte in Quadratmillimetern dividiren. Die so gefundenen Werthe der beiden Widerstände setzt man in die Formel des Ohm'schen Gesetzes ein, so findet man die Stromstärke. Solche Berechnungen sind in die Aufgaben aufgenommen. Die Stärke des Grove'schen und des Bunsen'schen Elementes ist nach verschiedenen Forschern 1,6 bis 1,9 des Daniell'schen.

Bemerkenswerth sind noch folgende Besonderheiten: Die höchsten elektromotorischen Kräfte, welche bis jetzt beobachtet wurden, fand Beetz an der Kette Platin-Kalium in Schwefelsäure und an der Kette Braunstein-Kaliumamalgam in übermangansaurem Kalium und Kalilauge. Die elektromotorische Kraft des Grove'schen Elementes steigt bis auf 2,5 des Daniell'schen, wenn die Schwefelsäure durch Kalilauge ersetzt wird. Das Grove'sche Element wird geschwächt auf $^2/_3$, wenn die Salpetersäure durch Chromsäure ersetzt wird, das Bunsen'sche Element dagegen nicht.

507 **Aufg.** 753. Warum gibt die Influenzmaschine keinen eigentlichen elektrischen Strom? Antw.: Die Saugspitzen wirken nicht continuirlich. — A. 754. In wiefern widerspricht Contactelektricität dem Princip von der Erhaltung der Kraft? Antw.: Arbeit kann nicht aus Nichtarbeit entstehen. — A. 755. In welchem Falle könnte dennoch Contactelektricität vom Princip der Erhaltung der Kraft aus zugegeben werden? Antw.: Annäherung, Druck, Entfernung der Platten. — A. 756. An der Volta'schen Säule die Verdoppelung der freien El. des einen Poles durch Berührung des anderen zu erklären. — A. 757. Welche Nachtheile hat Voltas Becherapparat, der Trogapparat und der Wollaston'sche Zellenapparat? — A. 758. Die Constanz von Bunsens Kette, von Meidingers Kette, von Leclanchés Kette und von den anderen in 495: 6 angegebenen Ketten durch ausführliche Darstellung der chemischen Processe zu erklären. — A. 759. Das Princip von der Erhaltung der Kraft an den Erscheinungen von Peltiers Kreuz nachzuweisen (s. 496.). — A. 760. Eine Zink- und Kupferdoppelplatte, deren elektrische Differenz = 2d ist, wird an der Kupferplatte mit einem Leiter von n mal größerer Oberfläche verbunden; wie groß ist dann die el. Dichte? Aufl.: Dichte der pos. El. = 2d (n + 1) : (n + 2), der neg. El. = 2d : (n + 2). — A. 761. Wie stellt sich eine Magnetnadel, wenn der Strom auf dem magnetischen Meridian senkrecht steht? Aufl. (?) — A. 762. Wie groß ist die Stromwirkung auf die Nadel, wenn der Strom im magnetischen Meridian liegt und die Nadel um 45° abweicht? Aufl.: Gleich der erdmagnetischen Wirkung. — A. 763. Denken wir uns, daß die erdmagnetische Wirkung auch eine Stromwirkung sei, die ihren Sitz in dem magn. Nordpole habe; wieviel mal größer müßte diese Stromkraft sein als die desjenigen Stromes, der um 1^{dm} von der Nadel entfernt diese auf 45° stellt, an einem Orte, der um n° von dem Nordpole entfernt ist? Aufl.: n . 15 . 7420 . 10 nach Biot-Savarts Gesetz (497.) — A. 764. Biot und Savart fanden ihr Gesetz durch die Schwingungsmethode; in einer Entfernung von 3^{cm} machte eine Nadel in 1 Min. 12 Schw.; wieviel mußte sie in 5^{cm} Entf. vollbringen? Aufl.: 9,2 Schw. — A. 765. Welche Windungen eines Multiplicators haben auf welchen Theil einer astatischen Nadel entgegengesetzte Wirkung; haben diese Windungen deßhalb keine Wirkung? — A. 766. Wie stellt sich eine astatische Doppelnadel, deren beide Theile nicht parallel sind? Aufl.: Der Meridian halbirt den Nadelwinkel; Beweis. — A. 767. Wie stark ist der Strom, der in 12 Minuten bei 20° Wärme und 750^{mm} Barometerstand 4000^{ccm} Knallgas liefert?

Aufl.: $(4000:12)(750:760):(1+0{,}003665 \cdot 20) = 306{,}67$. — A. 768. Wie groß ist die Reductionsconstante der in diesen Strom eingeschalteten Tangentenboussole, wenn an derselben eine Ablenkung von 35^0 beobachtet wird? Aufl.: $A = i : \operatorname{tang} \alpha = 438{,}1$. — A. 769. Welches ist die Stromstärke, wenn durch Einschalten einer Kette derselben Art die Ablenkung auf 49^0 gesteigert wird? Aufl.: 503,98. — A. 770. Zu beweisen, daß in einem Stromkreise aus verschiedenen Leitern die Gefälle den Querschnitten umgekehrt, den specifischen Widerständen direct proportional sind? — A. 772. Zu beweisen, daß die Gefälle proportional sind der Differenz der elektrischen Dichten zu beiden Seiten der Erregungsstelle? And.: Die Gefällcurven zu zeichnen und das Ohm'sche Gesetz zu benutzen. — A. 773. Welchen Querschnitt muß ein 150^{cm} langer Draht haben, um denselben Widerstand zu leisten, wie ein 80^{cm} langer Draht von 1^{qmm} Querschnitt und demselben Stoffe? Aufl.: $1{,}875^{qmm}$. — A. 774. Wie lang muß ein Eisendraht von 3^{mm} Dicke sein, um denselben Widerstand zu leisten, wie ein 1000^m langer Draht von 2^{mm} Dicke? Aufl.: 2250^m. — A. 775. Die elektromotorische Kraft eines Bunsen'schen Elementes sei e, der wesentliche Widerstand $w = 1$; wie groß ist die elektromotorische Kraft und der Widerstand in einer Batterie von 8 El., in der das Zink eines El. mit der Kohle des folgenden verbunden ist? Aufl.: 8e und 8. — A. 776. Wie groß sind beide, wenn die Zinke, wie die Kohlen paarweise verbunden sind? Aufl.: 4e und 2. — A. 777. Wie groß, wenn immer 4 Zinke und 4 Kohlen mit einander verbunden sind? Aufl. 2e und $^1/_2$. — A. 778. Wie groß, wenn alle 8 Zinke und alle 8 Kohlen verbunden sind? Aufl.: e und $^1/_8$. — A. 779. Wie groß ist in den 4 Fällen die Stromstärke, wenn der äußere Widerstand = der reducirten Länge l ist? Aufl.: $8e:(8+l)$; $4e:(2+l)$; $2e:(^1/_2+l)$; $e:(^1/_8+l)$. — A. 780. Wie groß sind in allen 4 Fällen die Stromstärken, wenn $l = 8$, 2, $^1/_2$ und $^1/_8$? Aufl.: $^1/_2e$, $^2/_5e$, $^4/_{17}e$, $^8/_{65}e$; $^4/_5e$, e, $^4/_5e$, $^8/_{17}e$; $^{16}/_{17}e$, $^8/_5e$, 8e, $^8/_5e$; $^{64}/_{65}e$, $^{32}/_{17}e$, $^{16}/_5e$, 4e. — A. 781. Welche Regel wird durch diese Zahlen bestätigt? Aufl.: Folgerung 9 des Ohm'schen Gesetzes. — A. 782. Der innere Widerstand eines von n Elementen sei w; in wievielen Gruppen, deren einzelne gleichartige Platten mit einander verbunden sind, muß man sie eintheilen, um das Maximum der Stromstärke zu erzielen, wenn der äußere Widerstand $= l$ ist? Aufl.: $x = \sqrt{(nl:w)}$. — A. 783. Welche der oben angegebenen Gruppirungen ist anzuwenden, wenn $w = 20$ und $l = 40$? Aufl.: A. 776. — A. 784. Wie groß ist die Stromstärke bei diesen Daten bei allen 4 Gruppirungen der 8 Bunsen'schen Ketten? Aufl.: $^1/_{25}e$, $^1/_{20}e$, $^1/_{25}e$, $^1/_{45}e$. — A. 785. Zwei Elemente seien in 2 Leitungen, a und b und eingeschaltet, die sich zu einem 3ten Drahte c vereinigen; wie groß sind in den 3 Leitungen die Intensitäten i, i' und i'', wenn die Widerstände derselben = w, w' und w'' und die el. Kräfte der Ketten e und e' sind? And.: Nach Kirchhoffs Gesetzen ist $i - i' - i'' = 0$; dann $iw + i'w' = e$; $iw + i''w'' = e$; $i'w' - i''w'' = e - e'$. Hieraus folgt $i = (e'w' + ew'') : (ww' + ww'' + w'w'')$; $i' = [e(w + w'') - e'w] : ww' + ww'' + w'w'')$; $i'' = e(w + w') - ew] : (ww' + ww'' + w'w'')$. — A. 786. In der Poggendorff'schen Compensationsmethode zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft wird die Verzweigung der vorigen Aufgabe so angewendet, daß $i'' = 0$ wird; in welchem Verhältnisse stehen dann die elektromotorischen Kräfte der beiden Ketten; Aufl.: $e' = ew : (w + w')$. — A. 787. In einer Batterie von n Elementen sollen die Platten s mal größer gemacht, aber auch s mal weniger Elemente genommen werden; wie groß ist die Stromstärke, wenn w der innere, l der äußere Widerstand und e die el. Kraft eines Elementes ist? Aufl.: $(ne:s):[(nw:s^2) + l]$. — A. 778. Wie groß ist die Stromstärke vor und nach dieser Theilung, wenn ursprünglich 12 Elemente vorhanden sind, deren elektromotorische Kraft 500, wesentlicher Widerstand = 20, äußerer Widerstand = 30 Silbereinheiten beträgt, und wenn $s = 3$ sein soll? Aufl.: $i = 24$ und 35,3. — A. 789. Welche Länge muß ein Eisendraht haben, damit er denselben Widerstand leiste, wie ein gleich dicker Kupferdraht von 1^m Länge? Aufl.: 17^{cm}. — A. 790. Welche Dicke muß ein Platindraht von 80^{cm} Länge besitzen, damit er denselben Widerstand leiste, wie ein Silberdraht von 1^m Länge und 3^{mm} Dicke? Aufl.: $6{,}7^{cm}$. — A. 791. Eine mit dem Beginne des Rheostaten eingeschaltete Tangentenboussole zeigte eine Ablenkung von 36^0; als nun voran gedreht wurde um 3^m des $1{,}2^{mm}$ dicken Argentandrahtes, ging die Nadel auf 10^0 zurück; wie groß ist der wesentliche Widerstand w und die elektromotorische Kraft? Aufl.: Die reducirte Länge des Argentandrahtes ist 26; daher $A \operatorname{tang} 36 = e : w$; $A \operatorname{tang} 10 = e:(w + 26)$; hieraus $w = 26 \operatorname{tang} 10 : (\operatorname{tang} 36 - \operatorname{tang} 10) = 8{,}332$ und $e = 26\, A \operatorname{tang} 10 \operatorname{tang} 36 : (\operatorname{tang} 36 - \operatorname{tang} 10) = 6{,}0535\, A$. — A. 792. Die elektromotorische Kraft eines Elementes sei = 600, der wesentliche Widerstand = 15 S.-E., der Schließungsbogen ein Kupferdraht von 5^m Länge und 2^{mm} Dicke. Wie groß ist die Stromstärke? Aufl.: Red. Länge des Drahtes = 1,62; $i = 600 : (15 + 1{,}62) = 36{,}1$. — A. 793. Zwölf Bunsen'sche Elemente mit einem inneren Widerstande = 15 und einem äußeren Widerstande = 20 sollen zu einer Batterie verbunden werden; welche Aufstellung ist die günstigste? Aufl.: Als 12 einfache $i = 12 \cdot 800 : (12 \cdot 15 + 20) = 48$;

als 6 doppelte $i = 6 . 800 : (6 . {}^{15}/_{2} + 20) = 74$; als 4 dreifache $i = 4 . 800 : (4 . 5 + 20) = 80$; als drei vierfache $i = 3 . 800 : (3 . {}^{15}/_{4} + 20) = 77$; als 2 sechsfache $i = 2 . 800 : (2 . {}^{15}/_{6} + 20) = 64$; als ein zwölffaches $i = 800 : ({}^{15}/_{12} + 20) = 38$; also als 4 dreifache. — A. 791. Es sei ein Eisendraht von 20m Länge und 2mm Dicke eingeschaltet; wie groß ist im ersten Falle die Stromstärke von 6 Bunsen'schen Elementen von einer el. Kraft = 900 und einem wesentlichen Widerstande = 10? Aufl.: 56.

3. Wirkungen des elektrischen Stromes.

a. In dem Stromkreise.

508 Die Wirkungen des elektrischen Stromes auf die Körper zerfallen in zwei Abtheilungen, in Wirkungen auf Körper in dem Stromkreise und in Wirkungen auf Körper außerhalb des Stromkreises oder Fernewirkungen. Die ersteren sind: 1. Die physiologische Wirkung, 2. die Wärmewirkung, 3. die Lichtwirkung, 4. die chemische Wirkung, 5. die mechanische Wirkung.

1. Die physiologische Wirkung des elektrischen Stromes ist die Wirkung desselben auf den menschlichen, thierischen und Pflanzenkörper, wenn ein solcher oder Theile eines solchen in den Stromkreis eingeschaltet sind. Da der menschliche Körper ein wenig guter Leiter ist, so ist für solche Wirkungen nach Ohms Gesetz eine vielplattige Batterie, z. B. eine Volta'sche Säule nöthig. Wenn der elektrische Strom durch den Körper oder Körpertheile geht, so empfindet man beim Oeffnen und Schließen eine schmerzhafte Zuckung; während des Durchgehens empfindet man bei einem schwachen Strome nichts oder höchstens ein Brennen an verletzten Stellen der die Pole berührenden Theile, bei einem starken Strome aber eine continuirliche innere Erschütterung, der bei längerer Dauer ein allgemeines Uebelbefinden folgt. Auch an Leichen nicht lange nach dem Tode werden die Muskelverziehungen oft in erschreckender Weise wahrgenommen, und selbst an sensitiven Pflanzen sind zuckende Bewegungen beim Oeffnen und Schließen des Stromes beobachtet worden. Ein schwacher Strom beim Oeffnen und Schließen durch dem Auge benachbarte Theile erzeugt einen Lichtschein, in der Nähe des Ohres ein Sausen, und der positive Pol hat einen sauren, der negative einen alkalischen Geschmack, wenn der Strom durch den Mund geht.

Man beobachtet die Zuckungen am einfachsten, wenn man die mit gesäuertem Wasser angefeuchteten Finger auf die beiden Pole einer Volta'schen Säule legt; um sie öfter zu wiederholen, berührt man mit der einen Hand mehrmals rasch hinter einander, oder man schaltet ein Blitzrad in den Schließungsdraht ein; die einfachste Form desselben ist ein Zahnrad, auf dessen Zähnen eine Metallfeder schleift, zu welcher der eine Poldraht geht, während der andere mit der Radachse verbunden ist. Der in den einen Draht eingeschaltete Mensch hält die Enden desselben mittels cylindrischer Handhaben in befeuchteten Händen. Berührt bei dem Drehen des Rädchens die Feder einen Zahn, so ist der Strom geschlossen, ragt sie in eine Zahnlücke, so ist der Strom geöffnet; man kann auf diese Weise die Zuckungen auch durch eine Menschenkette schicken. Diese Zuckungen sowohl als auch der durchgehende constante Strom werden medicinisch verwendet. Ure hat an einem seit einer Stunde Gehängten, der an Kopf und Füßen mit den 2 Polen verbunden war, durch die Muskelzuckungen den wechselnden Ausdruck der verschiedensten Empfindungen und Leidenschaften im Gesichte, ja sogar ein tiefes und angestrengtes Athmen wahrgenommen; auch an Thierleichen wurden solche Versuche gemacht, sowie an einzelnen Muskeln. Man schreibt den Nerven die Leitung der El. in solchen Fällen zu und nennt den von einem constanten Strome in einem Nerven hervorgerufenen Zustand den Elektrotonus, und einen von fortwährend unterbrochenen Strömen durchflossenen Nerven einen tetanisirten Nerven, weil ein solcher in dem zugehörigen Muskel eine dauernde Contraction, den Tetanus hervorruft. Die Wirkung auf das Auge wird wahrgenommen, wenn man mit dem einen Poldrahte das Gesicht in der Nähe des Auges berührt, während man den anderen in der Hand hält; ebenso bringt man für die Gehörwirkung den einen Poldraht ins Ohr und für die Geschmackwirkung auf die Zunge. — Pulvermachers Kette besteht aus Holzstückchen,

auf welche je ein Zink- und ein Kupferdraht sich nicht berührend aufgewunden sind, die mit den entsprechenden Drähten des folgenden Stückchens in Verbindung stehen.

Wie der el. Strom Lebenserscheinungen hervorruft, so bringen umgekehrt viele Lebenserscheinungen el. Ströme hervor. Am bekanntesten ist dies vom **Zitteraal, Zitterrochen** und **Zitterwels**; man erhält einen Schlag, wenn man mit beiden Händen diese Thiere berührt, ja nach Davy mittels eines Drahtes chemische, magnetische und Wärmewirkungen, ja sogar Funken. Beim Zitteraal liegt das elektrische Organ im Schwanztheile und besteht aus 400 zellgewebartig in mehreren Reihen neben einander stehenden Säulchen. Verbindet man die Enden eines empfindlichen Multiplicators mit dem Becken und dem Fuße eines Frosches, so zeigt die Nadel einen Strom an, den man **Froschstrom** nennt; derselbe ist wohl nur eine Folge des von Dubois-Reymond aufgefundenen **Nerv-Muskelstromes**, der an jedem Muskel und jedem Nerv gezeigt werden kann, wenn man von einem Punkte eines Längsschnittes zu einem Punkte eines Querschnittes einen um ein empfindliches Galvanometer gehenden Draht führt, und der nach jenem Forscher sich ändert, wenn eine Lebenserscheinung in Nerv und Muskel auftritt. Eine Folge dieses Stromes ist die merkwürdige Erscheinung, daß man durch Krümmen eines Fingers die Nadel eines eigens für diesen Versuch construirten, höchst empfindlichen, mehr als 6000 Windungen enthaltenden Galvanometers ablenken kann, dessen Drahtenden in 2 Glasgefäße voll Salzwasser tauchen; hält man in jedes Gefäß einen Finger und krümmt den einen für einige Zeit, so bemerkt man eine Ablenkung an der Nadel.

509 2. **Die Wärmewirkung des elektrischen Stromes; das galvanische Glühen.** Schließt man eine Batterie von großer Oberfläche, also von geringem wesentlichen Widerstande durch einen dünnen Metalldraht, so erfährt derselbe eine Temperaturerhöhung, die bis zur Gluth, ja bis zum Schmelzen des Drahtes steigen kann. Die in einer bestimmten Zeit entwickelte **Wärmemenge** ist dem Leitungswiderstande des Drahtes und dem Quadrat der Stromstärke proportional (Joules Gesetz 1841). Dieses Gesetz wurde durch theoretische Ueberlegungen gefunden und von Joule, Ed. Becquerel (1848) und Lenz (1844) durch Versuche zunächst für feste Leiter, von Joule selbst auch für Flüssigkeiten bestätigt. Demnach gilt Joules Gesetz nicht blos für einen Draht, sondern auch für den ganzen Stromkreis. Ist demnach die in der Einheit der reducirten Länge des Stromkreises entwickelte Wärmemenge $= q$, der Gesammtwiderstand $= w$, die Stromstärke $= i$, so ist die in der Zeit t entwickelte Wärme $Q = qwi^2t$. Da nun die elektromotorische Kraft e nach Ohms Gesetz $= iw$ ist, so ist Q auch $= qeit$, oder die Wärmemenge ist dem Product der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke proportional. Diese Form des Joule'schen Gesetzes stimmt überein mit dem Rieß'schen Gesetze über die beim elektrischen Schlage durch einen Metalldraht entwickelte Wärmemenge. Auch folgt aus derselben, daß bei gleichbleibender elektromotorischer Kraft die Wärmemenge der Stromstärke und der Zeit proportional wächst; da nun das in der Batterie verbrauchte Zink ebenfalls der Stromstärke und der Zeit proportional ist, so folgt hieraus der interessante Satz, daß die entwickelte Wärmemenge der verbrauchten Zinkmenge proportional ist. Favre (1854) hat diesen Satz noch dahin erweitert, daß die gesammte Wärmemenge gleich derjenigen ist, welche durch Ueberführung des Zinkes in Zinksulfat erzeugt wird, daß sie also durch Verbrennung des Zinkes entsteht.

Lenz wandte bei seinen Untersuchungen eine umgestürzte mit ihrem Stöpsel auf ein Brett befestigte Flasche an, durch deren Stöpsel die Poldrähte zu 2 Platinklötzchen gingen, von denen ein gewundener, durch seine eigene Festigkeit sich aufrecht haltender Platindraht in die Höhlung der Flasche ging, die mit Spiritus erfüllt war; durch einen in dem oben befindlichen Flaschenboden steckenden Stöpsel ging ein Thermometer in die Flüssigkeit. In den Stromkreis war ein Rheostat und eine Tangentenboussole eingeschaltet, so daß jede Aenderung der Stromstärke an der Boussole erkannt und durch Drehung an dem Rheostaten aufgehoben werden konnte. — Bei der Untersuchung der Flüssigkeiten mußte Joule den zersetzenden Einfluß des Stromes aufheben; in einer Kupfervitriollösung geschah dies dadurch, daß die beiden Platinklötzchen durch Kupferbleche ersetzt wurden; soviel Kraft durch Zersetzung des Kupfervitriols verzehrt wurde, ebenso viel wurde dann dadurch erzeugt, daß das an den positiven Pol gehende SO_4 sich dort mit dem Kupfer wieder zu Kupfervitriol verband. — Favre erhielt bei dem Verbrauche von 1 Atomgewicht = 33kg Zink 18160°;

da nun bei der Verbrennung von 1 Atg. Zink 42451° und bei der Vereinigung des Zinkoxyds mit Schwefelsäure 10292° entstehen, so ist die gesammte Wärmemenge = 52743°; rechnet man die zur Erzeugung von 1kg H nöthigen 34462° ab, so bleiben 18281° übrig, womit der Favre'sche Satz bestätigt ist. In der Daniell'schen Kette entsteht statt H 1 Atg. Cu, wofür 29645° nöthig sind; es bleiben folglich von der Kraft des verbrannten Zinkes 52743 — 29645 = 23098°; in der Grove'schen Kette wird dafür 1 Atg. Salpetersäure zu Stickstoffdioxyd reducirt, wofür 6900° nöthig sind; es bleibt daher hier von der Kraft des Zinkes übrig 52743 — 6900 = 45843°. — Diese Kraft verhält sich zu der des Daniell'schen Elementes wie 1,9 : 1, was mit dem Verhältnisse der elektromotorischen Kräfte beider Ketten stimmt und, wie alle die angeführten Sätze, sehr für die chemische Entstehung des el. Stromes spricht.

510 Die Temperaturerhöhung eines galvanisch erwärmten Drahtes ist dem sp. Leitungswiderstande desselben und dem Quadrat der Stromstärke direct, dagegen seinem Emissionsvermögen und der dritten Potenz seines Durchmessers umgekehrt proportional.

Beweis. Es seien d, l und s der Durchmesser, die Länge und das Emissionsvermögen des Drahtes und u der Ueberschuß seiner Temperatur über die seiner Umgebung, so ist die in der Zeiteinheit ausgestrahlte Wärme $= \pi d l s u$: die in derselben Zeit durch den elektrischen Strom entstehende Wärme ist $= q w i^2$. Die Temperatur des Drahtes ist constant, wenn die in der Zeiteinheit zugeführte Wärme der in derselben Zeit ausgestrahlten Wärme gleich ist, wenn also $\pi d l s u = q w i^2$. Ist nun der specifische Leitungswiderstand des Drahtes = s, so ist nach dem Ohm'schen Gesetze $w = 4 s l : (\pi d^2)$. Durch Einsetzung dieses Werthes in die vorhergehende Gl. ergibt sich der Temperaturüberschuß $u = 4 q s i^2 : (\pi^2 s d^3)$, womit der Satz bewiesen ist. Gleiche Versuche von Müller in Freiburg und Zöllner haben zwar die in diesem Satze liegende Folgerung nachgewiesen, daß die Temperatur bei gleicher Stromstärke von der Länge des Drahtes unabhängig ist, haben aber hinsichtlich der Durchmesser ergeben, daß die Stromstärken, welche Drähte verschiedenen Durchmessers zu gleichem Glühen bringen, sich wie die Durchmesser selbst verhalten, während sie nach dem Gesetze sich wie die Quadratwurzeln aus den dritten Potenzen derselben verhalten müßten; es sind also über diesen Gegenstand noch genauere Untersuchungen abzuwarten. Wenn aber gesagt wurde, die Temperaturen seien bei gleicher Stromstärke von der Länge des Drahtes unabhängig, so ist darunter nicht zu verstehen, daß eine und dieselbe Batterie die verschiedensten Drahtlängen zu gleichem Glühen brächte; dies ist nicht der Fall, da nach Ohms Gesetz die Stromstärke sich mit der Drahtlänge ändert, bei längerem Drahte geringer wird und daher eine Verstärkung der Batterie oder eine Verminderung der anderen Widerstände, z. B. des Rheostatendrahtes erfordert. Der Einfluß des äußeren Widerstandes, der Drahtlänge ist hier um so bedeutender, als zu Drahtwärmeversuchen nach Ohms Gesetz eine großplattige Batterie von geringem wesentlichen Widerstande genommen werden muß. — Daß die Temperaturerhöhung mit dem Leitungswiderstande wächst, zeigt besonders schön eine aus Silber- und Platindrahtstücken bestehende Kette, die man in den Stromkreis einschaltet; die Silberdrähte sind noch ganz dunkel, wenn die Platindrähte schon leuchtend glühen (Drapers Gesetz). — Auf das Glühen von Drähten hat auch die Umgebung nach Grove (1847) einen bedeutenden Einfluß; stürzt man über einen glühenden Draht eine Wasserstoffglocke, so hört das Glühen auf; leitet man ganz gleiche Drähte durch Wasserstoff oder ölbildendes Gas und durch Luft, so glüht der letzte schon, wenn der erste noch dunkel ist; es erklärt sich dies daraus, daß Wasserstoff eine viel größere Erkaltungsgeschwindigkeit besitzt als Luft (Clausius 1853).

Das galvanische Glühen hat Anwendung gefunden zum Sprengen aus der Ferne und unter Wasser. In Steinbrüchen wendet man zwei von der entfernt aufgestellten Batterie ausgehende, wohl von einander isolirte Kupferdrähte an, die zusammen durch einen Stöpsel in die in eine Mine eingesetzte Patrone bringen, dort etwas aus einander gehen und durch einen feinen Eisen- oder Stahldraht verbunden sind; wird der Strom geschlossen, so entzündet der Eisendraht durch seine Gluth das Pulver. Statt Pulver wendet man andere Zündsätze an, z. B. ein Gemenge von Kaliumchlorat und Schwefelantimon. Da indeß das galvanische Glühen nicht so regelmäßig eintritt, daß mehrere Patronen sich gleichzeitig entzünden und so mehrere Minen sich verstärken, während mittels des Inductionsfunkens dies möglich ist, so ist das Sprengen durch galvanisches Glühen wenig mehr im Gebrauche. Wenn es einmal gelingen wird, wie es mittels der magnet-elektrischen Maschinen möglich ist, el. Ströme von der Stärke einer Dampfmaschine zu erzeugen, so wird das galvanische Glühen noch ungeahnte Anwendungen erhalten, z. B. zum Fällen von Bäumen durch lange, dicke und starke weißglühende Drähte. Auch in der Medicin wird

es dann erweiterte Anwendung gewinnen, so in der Kauterisation, z. B. zum Abbrennen von Geschwulsten durch eine Schneideschlinge von glühendem Platindraht.

511 3. Lichtwirkung des elektrischen Stromes. Wenn man den metallischen Schließungskreis eines kräftigen galvanischen Stromes an irgend einer Stelle unterbricht, so springt zwischen den Unterbrechungsstellen, Elektroden genannt, ein Funke über; die Farbe des galvanischen Funkens ändert sich mit den Metallen der Elektroden; er ist um so lebhafter, je leichter die Metalle verdampfen oder verbrennen, am lebhaftesten, wenn man die beiden Drahtenden in Quecksilber taucht und das eine aus dem Quecksilber zieht. Der galvanische Funke ist nicht wie der elektrische Funke eine Vereinigung der beiden El. in der Luft, sondern eine Glüherscheinung, ein aussprühendes Verbrennen der letzten Theilchen der Elektroden.

Jacobi (1847) näherte die Enden des Schließungsdrahtes einer aus 12 Platin-Zink-Elementen bestehenden Säule bis auf 0,00 127mm, ohne daß ein Funke übersprang; daraus folgt, daß der gewöhnliche galv. Funke dem el. nicht identisch ist; der erstere entsteht auch nur, wenn die Elektroden in Berührung waren, der letztere auch ohne dies. Beim Aufhören der Berührung sind die letzten Moleküle der Elektroden noch vom el. Strome durchflossen, sie bieten wegen ihres kleinen Querschnittes einen sehr großen Widerstand, gerathen daher nach Joules Gesetz in lebhaftes Glühen und Verbrennen. Indessen können starke Batterien auch gewöhnliche el. Funken erzeugen. Gassiot (1844) construirte eine Batterie von 3500 Elementen, aus Kupfer und Zink in Regenwasser bestehend, und erhielt bei Annäherung der Elektroden bis auf 0,25mm Abstand Funken, welche 5 Wochen lang ununterbrochen übersprangen; die freie El. der Elektroden war auch so stark, daß ein Elektroskop schon in einer Entfernung von 6—8cm divergirte. Die starke Wirkung dieser Batterie, sowie ähnlicher Einrichtungen sprechen sehr gegen die chemische und für die Contact-Theorie.

Der galvanische Lichtbogen (Davy 1821) entsteht, wenn man die Drahtenden mit Kohlenstiften verbindet, die Spitzen derselben zur Berührung bringt und sie dann vorsichtig von einander entfernt; es bildet sich dann zwischen den Kohlenspitzen ein anhaltender Lichtbogen von blendendem Glanze. Derselbe entsteht dadurch, daß bei der Trennung der sich zuletzt berührenden Spitzen dieselben in galv. Glühen gerathen, dadurch losgerissen werden und von Pol zu Pol strömend eine Brücke für den el. Strom bilden. Wegen des großen Leitungswiderstandes dieser Bogenbrücke geräth sie nach Joules Gesetz in lebhaftes Glühen und Verbrennen, eine außerordentlich hohe Temperatur entsteht, durch welche immer neue Theilchen der Kohlenspitzen losgerissen werden und so die Leitung erhalten. Man kann deßhalb die Elektroden nach Herstellung der Brücke noch weiter von einander entfernen. Diese Entfernung wächst mit der Stärke des Stromes, mit der Verdünnung der Luft, besonders aber mit der Flüchtigkeit der Elektroden; zwischen Platinspitzen ist der Lichtbogen am kürzesten, am längsten zwischen mit Glaubersalz oder Aetzkali getränkten Kohlenspitzen. Die pos. Elektrode nimmt stark ab, zeigt sogar eine Grube, die neg. häufig zu; doch findet auch meist eine Abnahme dieser statt; auch die Temperatur der pos. Elektrode ist höher als die der neg., während an dieser die Lichtentwickelung energischer auftritt. Die Lichtintensität fanden Fizeau und Foucault bei Anwendung von 46 Bunsen'schen El. = 0,235 des Sonnenlichtes, während sie für das Drumond'sche Kalklicht nur 0,006 angeben. Die prismatische Untersuchung des Lichtbogens zeigt die Linien der Elektrodenstoffe und eine große Zahl chemischer Strahlen.

Zur Erzeugung des galv. Lichtbogens sind wenigstens 10—12 Grove'sche oder Bunsen'sche Elemente nöthig. Davy (1821) wandte eine Volta'sche Säule von 2000 Elementen an und konnte dann die Elektroden um 10cm von einander entfernen; als er die Luft auf 6mm Spannung verdünnte, konnte er die Entfernung bis auf 17cm vergrößern. Daß in dem Lichtbogen die Kohlentheilchen nicht blos glühen, sondern auch verbrennen, zeigt sich an der Verminderung des Glanzes in Gasen, welche die Verbrennung nicht unterhalten. Durch das Verzehren der Kohle wird der Abstand der Spitzen vergrößert, der Lichtbogen verlischt daher bald, wenn nicht der Abstand constant erhalten wird durch den Kohlenlichtregulator (Foucault 1849); dieser muß indeß nicht nur das Licht constant erhalten und einen sich nicht von der Stelle bewegenden Lichtpunkt erzeugen, sondern auch die Möglichkeit geben, den Lichtpunkt beliebig dirigiren zu können. Solche vollkommene Regulatoren

sind sehr kostspielige Apparate mit Uhrwerken, Elektromagneten u. s. w. Indessen gibt es jetzt einfachere Regulatoren von Serrin zu 350 Frcs., von Hefner-Alteneck zu 200 Mark, von Metzger in Alt-Breisach zu 130 Mark. Wir wollen nur eine einfache Construction beschreiben, welche wenigstens erkennen läßt, wie der el. Strom selbstthätig den Abstand der Kohlenspitzen, die in derselben vertical über einander stehen, regulirt. Der obere Kohlenstift sitzt in einem Arme des Ständers, der mit dem einen Pole in Verbindung steht, der untere in einem beweglichen Träger aus weichem Eisen, der mittels eines über eine Rolle gehenden und von einem Gewichte beschwerten Fadens in die Höhe gezogen werden kann und von einer Spule umgeben ist, deren Draht mit dem anderen Pole in Verbindung steht. Sind die Kohlen in Berührung und ist die Batterie geordnet, so ist der Strom geschlossen; dadurch wird der weiche Eisenträger ein Magnet und wird von der Spule nach unten gezogen, wodurch sich der Lichtbogen verlängert; wird er zu lang, so verliert er seine Leitungsfähigkeit, der Strom ist geöffnet und das Gewicht zieht den Träger wieder in die Höhe. Ist das Gegengewicht richtig gewählt im Verhältnisse zur Stromstärke, so bleibt die Distanz und damit auch der Lichtbogen ungeändert. Ist der Lichtbogen so mit einem Regulator versehen, so entsteht die elektrische Lampe, welche zahlreiche Verwendungen hat. Eine große Anzahl von physikalischen Versuchen erreicht mit derselben einen hohen Grad von Vollendung (s. Tyndall, on sound und dessen Heat considered as a mode of motion); besonders lassen sich Phosphorescenz- und Fluorescenzversuche mit derselben anstellen, weil sie viele ultraviolette Strahlen enthält; die Erscheinungen der Polarisation, Beugung, Interferenz, u. v. A. lassen sich objectiv mit derselben darstellen. Beleuchtet man mit derselben das Sonnenmikroskop, so erhält man das photoelektrische Mikroskop. Auf Leuchtthürmen, wo das el. Licht fast ausschließlich Verwendung hat, erzeugt man es übrigens nicht durch eine galv. Batterie, sondern mittels magnetel. Maschinen. Bei ununterbrochenen Bauten, besonders bei Bauten unter Wasser hat das el. Licht bedeutende Verwendung gefunden, denn die el. Lampe leuchtet auch im Wasser. Sonst dient sie noch zu zahlreichen Schau- und Festzwecken; öffentliche Festbeleuchtungen werden durch el. Lichter besonders brillant, in der Oper „der Prophet“ geht eine el. Sonne auf, in der Oper „Moses“ leuchtet der Gesetzgeber, so oft er vor dem Volke erscheint, die Geistererscheinungen werden jetzt mit ebenen schief aufgestellten Spiegeln hervorgerufen, in denen sich Figuren abbilden, die unter der Bühne von el. Lichte grell beleuchtet sind; wer erinnert sich nicht der zauberhaften Erscheinungen, die unter den lächerlichen Namen „Kalospinthechromokrene“ und „Chromatpchelatarattapoikile“ dem el. Lichte selbst auf den Jahrmärkten Ansehen verschafft haben? — Seit der Erfindung von kräftigen und zuverläßigen magnetelektrischen Maschinen durch Gramme und v. Hefner-Alteneck (532.) gewinnt das el. Licht täglich mehr Ausbreitung auch im gewöhnlichen Leben. Man nennt die magnetel. Maschinen, die zur Herstellung des el. Lichtes im Großen dienen, Lichtmaschinen. Während Ende 1875 in Frankreich erst 12 Lichtmaschinen im Gebrauche waren, belief sich Ende 1876 die Zahl derselben schon auf 300. Sie werden hauptsächlich zur Beleuchtung von Güterhallen, Bahnhöfen, Fabrikräumen, Hafenhallen u. s. w. benutzt. Gewöhnlich hat das hierbei verwendete Licht eine Stärke von 2000 Normalkerzen, doch kann man auch Licht von 20—40000 Kerzen Lichtstärke, stärker wie das Sonnenlicht, erzeugen. Solche el. Sonnen wurden im türkisch-russischen Kriege zur Erhellung der Donau bei nächtlichen Brückenbauten benutzt und ermöglichten die Rettung von Odessa vor einem nächtlichen Ueberfalle der türkischen Flotte. Die Nachtheile des el. Lichtes, seine allzustarke Concentration in einem Punkte, die schwache Erhellung ferner Stellen, die große Dunkelheit nicht direct bestrahlter Räume, werden schon jetzt mehr oder weniger überwunden. Seine Vorzüge gegen die Gasbeleuchtung sind: Ganz unvergleichliche Billigkeit, die völlige Weiße und daher das unveränderte Aussehen der Farben, kein Verbrauch von Sauerstoff und keine Bildung von Kohlendioxyd, keine Hitze, keine Feuer-, Explosions- und Erstickungsgefahr, keine übeln Gerüche, wie sie die Undichtheit der Gasleitungen bewirkt u. s. w. — Die Kohle, welche zu der el. Lampe verbraucht wird, ist die sogenannte Retortenkohle, die sich in dichten Schichten an den oberen Stellen der Gasretorten, die am stärksten erhitzt werden, ansetzt; sie ist schwarz, metallisch glänzend, sehr hart und doch porös, und schwierig zu schneiden. In dem Lichtbogen gelangen diese Kohlentheilchen in eine Weißgluth, welche wahrscheinlich die höchst erreichbare Temperatur enthält; denn selbst die schwerstschmelzbaren Metalle wie Silber, Gold, Platin werden in demselben geschmolzen und verflüchtigt; ja Despretz gelang es sogar, mittels einer Bunsen'schen Batterie von 600 Elementen schwer schmelzbare Erden zu schmelzen, die Kohlenspitzen verdampften und bildeten einen krystallinischen Sublimatansatz, 2 Kohlenstückchen wurden an einander geschweißt. Daß man flüchtigere Metalle im Lichtbogen verdampfen und ihr Dampflicht dann mit dem Spectroskop untersuchen kann, wurde schon erwähnt; man macht zu dem Ende eine Grube in die pos. Elektrode, legt in dieselbe kleine Metallstückchen und schließt dann den Strom; der Lichtbogen wird bei Anwendung

von Kupfer blau, von Zink violett, von Lithium roth, und gibt ein continuirliches Spectrum mit besonders hellen Linien an den Stellen, die den Metallen eigen sind, oder auch umgekehrt mit dunkeln Linien an denselben Stellen, wenn die Metalldämpfe als Wolke das Licht umgeben (s. 324.). — Sämmtliche Lichtwirkungen des el. Stromes geschehen unter großem Widerstande, bedürfen daher einer vielplattigen Batterie; so sind die Funkenwirkungen mittels der Volta'schen Säule am leichtesten wahrzunehmen; man verbindet den einen Poldraht mit einer Feile und streicht mit dem Ende des anderen Poldrahtes über dieselbe hin, so entsteht ein fortwährendes Funkensprühen.

512 4. **Chemische Wirkungen des galvanischen Stromes. Die Elektrolyse.** Wenn ein chemisch zusammengesetzter, leitender, flüssiger oder wenigstens erweichter Körper in den Stromkreis eingeschaltet wird, so wird er zersetzt; der pos. Strom führt den positiven Bestandtheil mit sich fort und der negative Strom den negativen Bestandtheil, oder, wie man den Vorgang auffassen kann, die negative Eintrittstelle des Stromes zieht den positiven, die positive den negativen Bestandtheil an. Diese Erscheinung nennt Faraday (1835) **Elektrolyse** und den der E. unterworfenen Körper **Elektrolyt**. Die Drähte oder anderen Metallformen, durch welche der Strom in den Elektrolyt eintritt, heißen **Elektroden**, und zwar diejenige Elektrode, durch welche der pos. Strom eintritt, die pos. Elektrode oder **Anode**, und diejenige, durch welche der pos. Strom aus- und der neg. eintritt, neg. Elektrode oder **Kathode**. Die Zersetzungsproducte werden **Jonen** genannt, und zwar das an die Anode tretende das neg. Jon oder **Anion** und das an die Kathode tretende das pos. Jon oder **Kation**. Die einfachste Elektrolyse ist die schon in 498. betrachtete des Wassers, bei welcher der Sauerstoff als Anion an die Anode, der Wasserstoff als Kation an die Kathode geht. Die beiden Gase entwickeln sich hierbei in dem Verhältnisse, wie sie zusammen Wasser bilden, 1 Volumen Sauerstoff auf 2 Volumina Wasserstoff. Der Sauerstoff erscheint indeß häufig in geringerer Menge, weil er etwas stärker von Wasser absorbirt und an den Elektroden verdichtet wird als der Wasserstoff, weil ein Theil des elektrolytischen Sauerstoffs ozonisirt und mit der Ozonbildung eine Verdichtung verbunden ist, und weil sich dann auch Wasserstoffsuperoxyd an der Kathode bildet, das einen Theil des Sauerstoffs in Anspruch nimmt. Voltametrische Messungen sind daher am genauesten, wenn man nur den Wasserstoff berücksichtigt, und wenn sich dieser an einer kleinen Elektrode ausgeschieden hat.

Die Elektrolyse erklärte man nach Grotthuß folgendermaßen: Man nimmt an, daß die Bestandtheile der Elektrolyten entgegengesetzt el. seien, daß z. B. in jedem Wassermolekül der Wasserstoff pos., der Sauerstoff neg. el. ist. Im gewöhnlichen Zustande haben die Moleküle alle nur denkbaren Lagen gegen einander; werden sie aber mit einem el. Strome verbunden, so werden die Moleküle gedreht, die pos. Atome nach der Kathode, die neg. nach der Anode zu. So drehen sich, wenn z. B. Wasser in den Stromkreis eingeschaltet wird, sämmtliche Moleküle so, daß der neg. O jedes Moleküls nach der pos. Elektrode, der pos. H nach der neg. Elektrode hin gerichtet ist. Demnach ist in einer zwischen beiden Elektroden befindlichen Molekülreihe der Sauerstoff des ersten Moleküls in Berührung mit der pos. Elektrode, wird von dieser angezogen, während der Wasserstoff desselben Moleküls von derselben abgestoßen wird; dadurch wird dieses Molekül zerlegt, der Sauerstoff bleibt bei der Elektrode, der Wasserstoff wird an das zweite Molekül gestoßen in enge Berührung mit dem Sauerstoff desselben, der ebenfalls durch die Anziehung und Abstoßung der Elektroden von seinem Wasserstoff getrennt wurde und sich daher mit dem Wasserstoff des ersten Moleküls zu einem neuen Wassermolekül vereinigt. Dasselbe geschieht durch die ganze Reihe hindurch; der Wasserstoff eines vorausgehenden Moleküls vereinigt sich mit dem Sauerstoff des folgenden zu Wasser, so daß in der ganzen Reihe unverändert Wasser vorhanden bleibt, während nur der Wasserstoff des letzten Moleküls keinen Sauerstoff mehr findet und daher an der neg. Elektrode übrig ist, die durch ihre Anziehung und Abstoßung an diesem Ende der Reihe gerade so, aber in entgegengesetzter Weise und in entgegengesetzter Richtung wirkt, wie die pos. Elektrode am anderen Ende, wodurch sich die beiden Wirkungen gleich werden und demnach vereinigen. Weil hiermit eine Ausgleichung der El. bewirkt wird, so ist mit der Zersetzung ein el. Strom verbunden, und weil mit der Zersetzung ein el. Strom verbunden ist, so ist für die elektrolytische Wirkung ein Leiter nöthig. Nur leitende Flüssigkeiten erfahren die Elektrolyse, und mit der Elektrolyse geschieht

die Leitung; Flüssigkeiten leiten nur dann den Strom elektrolytisch, indem sie zersetzt werden. Nach der ersten Wirkung der Elektrolyse, d. i. nach der ersten Wendung, Spaltung und Vereinigung der Moleküle und der hierdurch bewirkten Ausscheidung an den Elektroden wiederholt sich immerfort derselbe Vorgang; wieder werden die Moleküle gedreht und zerrissen und zwischen den Elektroden die Atome neu vereinigt und an denselben ausgeschieden. Clausius (1857) machte darauf aufmerksam, daß zum fortwährenden Drehen der Moleküle und zum Auseinanderreißen der entgegengesetzt el. und darum sich stark anziehenden Atome eine große Kraft nothwendig sei, daß demnach die Elektrolyse nach dieser Theorie erst bei einer gewissen Stromstärke eintreten könne, während sie doch erfahrungsgemäß derselben proportional sei. Um diesen Widerspruch zu lösen, benutzt Clausius seine jetzt ziemlich allgemein angenommene Hypothese der molekularen Bewegungen, nach welcher auch die Atome innerhalb der Moleküle, also die entgegengesetzt el. Jonen gegen einander in Bewegung sind und sich daher nur mit geringer Kraft festhalten, so daß eigentlich in einer Flüssigkeit ein fortwährender Austausch der nach allen Richtungen sich bewegenden Jonen stattfinde. Durch einen el. Strom nun werde diese Bewegung der Atome geregelt, in eine Richtung nämlich nach den Elektroden hin gezwungen, und zwar so, daß die pos. Jonen mit dem pos. Strom nach der Kathode hin, die neg. nach der Anode hin ihre molekulare Bewegung vollbringen; die weiter von den Elektroden entfernten Atome begegnen hierbei immer noch dem entgegengesetzten Jon, vereinigen sich also mit demselben, während für die an die Elektrode grenzenden Atome eine solche Begegnung nicht mehr möglich ist und dieselben daher frei werden.

Weil bei der Elektrolyse der Strom einen großen äußeren Widerstand zu überwinden hat, so muß nach Ohms Gesetz eine vielplattige Batterie genommen werden; besonders ist dies der Fall, wenn man reines Wasser zersetzen will. Hat man aber die Leitungsfähigkeit des Wassers durch etwas Schwefelsäure erhöht, so reichen auch schon zwei Grove'sche Elemente aus. Indessen wäre der Widerstand doch sehr groß, wenn man die Elektroden in Form von Drahtenden anwenden wollte, weil dann die zwischen denselben befindliche Flüssigkeit selbst Drahtform, also einen sehr kleinen Querschnitt hätte; man läßt deßhalb die Drähte in lange und breite Platinblechstreifen übergehen; dies ist die gewöhnliche Form der Elektroden. Bei Anwendung solcher hat der Strom einen großen Querschnitt und daher eine geringe Dichte; es gibt aber auch Fälle, in denen eine große Stromdichte, also ein geringer Stromquerschnitt vorzuziehen ist; so sind z. B. die Störungen bei der Wasserzersetzung um so geringer, je schmaler die Elektroden sind.

Elektrolysen; das elektrolytische Gesetz (Faraday 1853). Die Wasserstoffsäuren werden in einen Salzbildner und Wasserstoff zersetzt; der Salzbildner geht an die Anode, ist also neg., der Wasserstoff an die Kathode. Die sogenannten Haloidsalze werden ebenfalls in einen an der pos. Elektrode sich sammelnden Salzbildner und in ein Metall zerlegt, das sich an der neg. Elektrode ausscheidet. Die gewöhnlichen Salze erfahren dieselbe Zersetzung in ein Metall, das zur Kathode geht, und in ein elektroneg. zusammengesetztes Radical, das an der Anode ausgeschieden wird. Ist diese ein stark pos. Metall, so vereinigt sich dieses mit dem Radical zu einem Salze, das in gleicher Weise zersetzt wird und daher das Metall der pos. Elektrode an die neg. führt. Ist aber die Anode schwach pos., so vereinigt sich das Radical mit dem Wasserstoff des gewöhnlich vorhandenen Wassers zu einer Säure, und Sauerstoff wird frei. Ist das ausgeschiedene Metall, das zur Kathode geht, sehr stark pos., so tritt es in das gewöhnlich vorhandene Wasser ein und bildet eine Basis, wodurch Wasserstoff frei wird; im anderen Falle scheidet sich das Metall regulinisch an der Kathode aus. Die gewöhnlichen Basen werden ebenfalls in Metall und Wasserstoff am neg. Pole und in Sauerstoff am pos. Pole zerlegt, da dieselben gemäß der modernen Chemie aus einem Metall, Wasserstoff und Sauerstoff bestehen. Diejenigen Wirkungen, welche nicht rein durch die Elektrolyse, sondern nach derselben durch die chemischen Eigenschaften der Jonen erzielt werden, nennt man secundäre Actionen; solche sind die Einwirkung der Jonen auf die Elektroden, am meisten des Anions auf die Anode, dann die Einwirkung der Jonen auf den Elektrolyten und endlich die Wirkung der Jonen auf einander.

513

Die Elektrolyse eines und desselben Stoffes ist der Stromstärke proportional; die Elektrolyse verschiedener Stoffe durch denselben Strom geschieht im Verhältnisse der Atomgewichte.

Dieses elektrolytische Gesetz wurde von Faraday aufgefunden, indem er in einen und denselben Stromkreis ein Voltameter und eine Zersetzungszelle einschaltete und dann die Menge der entstandenen Jonen mit der des entstandenen Knallgases verglich; bei gleichen Knallgasmengen waren immer Mengen der Jonen entstanden, die im Verhältnisse der Atomgewichte zu einander und zu dem Knallgase standen; zersetzte er z. B. Wasserstoffsäuren, so entstand für gleiche Knallgasmengen auch immer dasselbe Volumen Wasserstoff. Für gelöste Salze wurde das Gesetz seitdem von Daniel, Buff u. A. nachgewiesen.

Bei der Elektrolyse stark concentrirter Wasserstoffsäuren werden nur diese, nicht aber das Wasser zersetzt; man erhält daher von Salzsäure an der Kathode Wasserstoff, an der Anode nur Chlor, aber nur sehr wenig, weil dasselbe vom Wasser stark absorbirt wird. Um die stärksten pos. Metalle, wie Kalium, Natrium, Calcium aus ihren Chlorverbindungen abzuscheiden, schmilzt man sie in einem Tiegel von Bunsen'scher Kohle, der als Anode dient, und hält einen Eisendraht als Kathode in die geschmolzene Masse; das reducirte Metall setzt sich dann an den Eisendraht an; übrigens ist es Bunsen gelungen, diese Metalle auch aus concentrirten Lösungen der Haloidsalze auszuscheiden; beide Processe geschehen auch mit den Haloidsalzen der schweren Metalle. — Kupfervitriol $Cu . SO_4$ wird zersetzt in Cu und SO_4, Cu geht an den neg. Pol und SO_4 an den pos. Pol; findet es dort z. B. Cu, so entsteht neues Kupfervitriol, das abermals zersetzt wird, wodurch das Cu des pos. Poles an den neg. gelangt; findet SO_4 aber an der Anode Platin, so zerfällt es in SO_3 und O, wenn kein Wasser vorhanden ist; ist aber solches, wie gewöhnlich, vorhanden, so entsteht H_2SO_4 Schwefelsäure, während O frei wird. Solche secundäre Actionen treten bei der Elektrolyse sehr häufig auf. — Natriumsulfat oder Glaubersalz ($Na_2 . SO_4$) wird zersetzt in Na und SO_4; das Radical SO_4 wird an der Anode zu Schwefelsäure und Sauerstoff, das Metall Na vereinigt sich mit H und O des Wassers (H_2O) zu NaHO, Natron, wodurch 1 At. H frei wird; es entstehen also an der Kathode Natron und Wasserstoff. Demnach wird das Salz scheinbar in seine Säure und in seine Basis zerlegt, was auch bei ähnlichen Salzen in ähnlicher Weise stattfindet. Man zeigt dies mittels einer U-förmigen Röhre, die mit der blaugefärbten Salzlösung gefüllt ist, und in welche Platinbleche als Elektroden eingeführt sind; die Seite der neg. Elektrode wird von der Basis grünlich, die der pos. Elektrode von der Säure roth gefärbt. Bei dem Versuche mit Glaubersalz entstehen den Atomgewichten proportionale Mengen H_2SO_4, O, NaHO und H durch denselben Strom, der nur 1 Atg. Wasser oder Chlorblei zersetzt; wenn man Glaubersalz als $Na_2O . SO_3$ ansieht nach der älteren chemischen Anschauung, so widerspricht die letzte Erscheinung dem elektrolytischen Gesetze; sie ist also eine Hauptstütze der modernen Chemie (57.). Die Bildung von Natron und Wasserstoff ist hier eine secundäre Action; dieselbe Action verhindert die Darstellung der Alkalimetalle durch Elektrolyse concentrirter Lösungen der Alkalien; elektrolysirt man z. B. Kalilauge KHO, so hat es den Anschein, als ob nur Wasser zersetzt würde, indem das an die Kathode gehende Kalium sich mit H und O des Wassers vereinigt zu KHO, Kali, so daß H an der Kathode frei wird. Besteht die Kathode aus Quecksilber, so erhält man Kaliumamalgam, aus welchem das Kalium durch Abdestilliren des Quecksilbers gewonnen werden kann; in derselben Weise kann man Natrium, wie auch die Metalle der alkalischen Erden durch Elektrolyse erhalten. Davys berühmte erste Elektrolysen der Alkalien (1807) ergaben ebenfalls nicht die reinen Metalle; er schmolz in einem als Anode dienenden Platinlöffel Kali oder Natron und tauchte in die flüssige Masse einen Platindraht als Kathode, an welcher sich das reducirte Metall sammelte, aber sofort verbrannte. Interessant sind die Elektrolysen der Ammoniaksalze, weil sie Berzelius zu der Annahme des Ammoniums (NH_4) führten. Alle diese Salze erzeugen an der Kathode NH_4, das gewöhnlich in Amoniak und Wasserstoff übergeht; besteht aber die Kathode aus Quecksilber, so entsteht Ammoniumamalgam, das durch Erhitzen zerfällt in Ammoniak, Quecksilber und Wasserstoff. Bei der Elektrolyse von Salmiak zersetzt das an die Anode gehende Chlor den Salmiak und entwickelt zuerst Stickstoff und dann Chlorstickstoff; ist die Salmiaklösung mit einer dünnen Schicht von Terpentinöl bedeckt, so explodiren die aufsteigenden Chlorstickstofftröpfchen bei der Berührung des Oeles.

Andere secundäre Actionen sind: Bei der Elektrolyse von Goldchlorid und Platinchlorid vereinigt sich das an die Anode gehende Chlor mit derselben, selbst wenn die Anode Platin oder Gold ist (Auflösung der Anode durch das Anion). Die Elektrolyse von Zinnchlorür geschieht deßhalb mit einer Anode von Graphit; dann vereinigt sich das Chlor mit dem Zinnchlorür zu Zinnchlorid, das in Dampfform entweicht (Wirkung des Anions auf den Elektrolyt). Eine gleiche Wirkung ist die Entstehung der Superoxyde an der Anode. Wenn man Bleizuckerlösung elektrolysirt, so entstehen an der Kathode Bleikrystalle, an der Anode vereinigt sich der Sauerstoff mit dem Bleioxyd zu Bleisuperoxyd. Ebenso entstehen Nickelsuperoxyd, Silbersuperoxyd u. a. — Wenn man Kupferchlorid elektrolysirt, so vereinigt sich das an die Kathode gehende Kupfer mit dem Kupferchlorid zu Kupferchlorür.

Bei der Elektrolyse von Schwefelsäure entsteht an der Anode Sauerstoff, an der Kathode Schwefel, Schwefeldioxyd, Schwefelwasserstoff und wenig Wasserstoff (Wirkung des Kations auf den Electrolyt). —

Daß die secundären Actionen wirklich chemische Wirkungen der frei gewordenen Jonen und nicht elektrolytische Wirkungen sind, geht aus mehreren Umständen hervor, z. B. bei der Zerlegung von Glaubersalz in Schwefelsäure und Sauerstoff an der Anode und in Natron und Wasserstoff an der Kathode. Wäre die Entstehung von Wasserstoff und Sauerstoff eine elektrolytische Wirkung, so dürfte nicht eine äquivalente Menge von H und O entstehen, wie dies immer der Fall ist, sondern anfänglich gar keine und am Schlusse eine geringere zufällige Menge, weil bei der Zersetzung von concentrirten Lösungen das Wasser zuletzt elektrolysirt wird, eine Erscheinung, welche Hittorf damit erklärt, daß der Strom sich nach den Gesetzen der Zweigströme auf die Bestandtheile eines gemischten Elektrolyten nach ihrer Leitungsfähigkeit vertheile, wodurch auf das Wasser wegen seines großen Widerstandes nur ein kleiner Stromantheil komme, der zu sofortiger Zersetzung desselben nicht ausreiche. Dann müßte auch bei anderen ähnlichen Salzen eine gleiche Zerlegung eintreten, während z. B. bei der Elektrolyse von $Cu . SO_4$ wohl O, aber kein H entsteht. Der Hauptgrund liegt aber in dem elektrolytischen Gesetze, welchem die meisten secundären Actionen widersprechen würden, wenn man sie als elektrolytische Wirkungen auffassen wollte; so wäre z. B. in dem obigen Falle ein Atg. Salz und ein Atg. Wasser in der Zersetzungszelle elektrolysirt, während in dem Voltameter nur 1 Atg. Wasser zersetzt wird. Auch liegt noch ein Grund darin, daß selbst bei der Elektrolyse der alkalischen Erdsalze durch einen Strom von großer Dichte kein Wasserstoff entsteht, indem an dem dünnen Drahte der Kathode das sich anhäufende Metall dem Wasser nur wenig Berührung bietet und sich so vor Oxydation schützt. Das Urtheil über die Wirkungen der Elektrolyse wird noch dadurch erschwert, daß die Jonen sich durch Diffusion und durch den Strom selbst in dem ganzen Elektrolyt verbreiten; um dieses zu verhindern, und die Jonen deutlich zu trennen, wandte Daniell ein U-förmiges Gefäß an, das an den Umbiegungen mit thierischer Blase zugebunden war, während der eine Schenkel die Anode, der andere die Kathode enthielt; es sammelte sich so in dem einen Schenkel das Anion, in dem anderen das Kation, während der untere Bogen die unveränderte Flüssigkeit enthielt. Da die Blase aber von Diffusion und Fortführung durch den Strom nicht schützt, so brachte Wiedemann die Verbindung der 2 Gefäße oben zuwege, durch 2 aus den beiden Gefäßen sich erhebende Glasröhren, die durch Umbiegen genähert und durch einen mit einem Hahne verschließbaren Kautschukschlauch verbunden waren, und in welche vor dem Schließen des Hahnes die Flüssigkeit durch Saugen an dem Hahne hinaufgezogen wurde.

514 **Wanderung der Jonen. Polarisationsstrom.** Untersucht man mittels solcher Apparate die Quantität der Jonen im Vergleiche zu der Concentration der Elektrolyten an beiden Polen, so zeigt sich eine Erscheinung, die man die W a n d e r u n g d e r J o n e n nennt. Da nämlich an der Anode sich ein Atg. des Anions und an der Kathode 1 Atg. des Kations ausscheidet, so könnte man sich denken, von der Anode sei von 1 Atg. des Elektrolyten $^1/_2$ Kation fortgegangen und dadurch $^1/_2$ Anion frei geworden; ebenso sei von der Kathode $^1/_2$ Atg. Anion fortgegangen und dadurch $^1/_2$ Kation frei geworden; zu diesem $^1/_2$ Kation geselle sich das $^1/_2$ Kation, das von der Anode fortgegangen sei und bilde so das Atg. Kation; und endlich sei das von der Kathode fortgegangene $^1/_2$ Anion zu dem an der Anode frei gewordenen $^1/_2$ Anion getreten und habe so das Atg. des Anions gebildet. Hätte der Vorgang wirklich in dieser Weise stattgefunden, so wäre an der Anode wie an der Kathode von je 1 Atg. des Elektrolyten $^1/_2$ Atg. zurückgeblieben, die Concentration der Lösung müßte also nach wie vor an beiden Elektroden gleich sein. Dies ist nun aber nicht der Fall, folglich kann auch der Vorgang nicht in der angeführten Weise stattgefunden haben; es muß in der einen Richtung mehr als $^1/_2$ z. B. $^2/_3$ Jon fortgegangen, also an derselben Elektrode $^2/_3$ des anderen Jons freigeworden sein, so daß sich von der anderen Elektrode her nur $^1/_3$ dieses anderen Jons in der entgegengesetzten Richtung herbei zu bewegen brauchte, um das ganze Atg. des gebliebenen Jons zu bilden; deßhalb wurde auch von dem ersten Jon an der anderen Elektrode nur $^1/_3$ frei, das sich mit den von der ersten Elektrode hergekommenen $^2/_3$ zu dem ganzen Atg. des ersten Jons vereinigte. So ist es z. B. bei Chlorbarium; es wandern $^2/_3$ Atg. Chlor, aber nur $^1/_3$ Barium; und in den meisten Fällen ist der Betrag des wandernden Anions größer als der des Kations.

Wenn man die Platinplatten eines Voltameters oder eines Wasserzersetzungsapparates rasch von der Batterie trennt und mit einem Galvanometer verbindet, so findet man, daß das Voltameter oder der Wasserzersetzungsapparat wie eine Kette wirken; sie erzeugen nämlich eine Ablenkung der Nadel, also auch einen el. Strom, und zwar, wie man leicht an der Nadel sieht, einen Strom von entgegengesetzter Richtung wie die Batterie. Diese Erscheinung erklärt sich dadurch, daß an der Oberfläche der Anode sich eine dichte Sauerstoff-

schicht, an der Oberfläche der Kathode eine Wasserstoffhaut gebildet hat; da nun H pos. ist und O neg., und da die beiden durch Flüssigkeit und den Schließungsbogen verbunden sind, so bilden sie einen Strom, der in dem Wasser vom H an der Kathode zum O an der Anode geht, während der ursprüngliche Strom die entgegengesetzte Richtung hatte. Folglich mußte der ursprüngliche Strom durch diesen Gegenstrom geschwächt werden. Weil die beiden Elektroden auf diese Art zu Polen eines neuen Stromes werden, so nennt man sie polarisirt, und den neuen Strom **Polarisationsstrom**. Durch die Schwächung des Stromes, welche durch diese Polarisation bei Einschaltung eines Voltameters in einen Stromkreis herbeigeführt wird, und welche auch in der nicht constanten Batterie vorhanden ist, wurde man zuerst auf diese Erscheinung aufmerksam; man hielt die Schwächung für die Folge des Widerstandes der Flüssigkeit des Voltameters, mußte aber diese Ansicht aufgeben, als man den Widerstand bei Verdoppelung der flüssigen Schicht nicht verdoppelt, sondern nur wenig vergrößert fand; dann hielt man sie für die Folge eines vermutheten Uebergangswiderstandes an den Elektroden, indem man sich dachte, daß der Uebergang des Stromes aus einem festen in einen flüssigen Körper und umgekehrt einen Theil der Kraft verzehre. Als man endlich fand, daß die Entwickelung von O an der Kathode und von H an der Anode den Polarisationsstrom aufhebt, weil dann die den Polarisationsstrom erzeugenden Gasschichten zu Wasser werden, da war man überzeugt, daß die Polarisation die Ursache der Stromschwächung sei. Allerdings ist auch noch ein anderer Widerstand am Uebergange möglich, z. B. wenn sich eine Elektrode mit einer Oxydschicht bedeckt, oder wenn sich an den beiden Elektroden je eine Säure und eine Basis entwickeln, die ebenfalls als Elektromotoren einen Strom entwickeln; aber einen eigentlichen Uebergangswiderstand gab man vollständig auf, als man den Einfluß der Polarisation zu berechnen verstand und die Stromschwächung, wenn die eben genannten Widerstände beseitigt waren, jenem Einflusse gleich fand. Da der Polarisationsstrom sehr kurz ist, weil er selbst die ihn aufhebenden Gase entwickelt, so ist zu seinem Studium ein rasch wirkender Umschalter nöthig, mit welchem man den ursprünglichen Strom aus einem Kreise aus- und den Polarisationsstrom einschalten kann; dafür hat Poggendorff (1844) seine **Wippe** construirt, mittels welcher man die Umschaltungen so schnell vornehmen kann, daß der Polarisationsstrom einer Reihe von Voltametern, einer sogenannten **Ladungssäule**, sogar den Hauptstrom verstärken kann. Einer ähnlichen Wirkung wie die Polarisation entspringt auch Groves **Gassäule** (1830), eine langwirkende galvanische Batterie, deren Elektromotoren O und H sind. Sie besteht aus einer langen Glasröhre, an der unten Glasglocken hängen, die in Gefäße mit gesäuertem Wasser gestülpt sind und dort je ein Platinblech einschließen; jedes dieser Platinbleche steht mit einem zweiten, halb aus der Flüssigkeit ragenden Platinbleche des folgenden Elementes in Verbindung, und empfängt aus der gemeinsamen Röhre H, das sich in einem Wasserstoffapparat am einen Ende dieser Röhre entwickelt; da nun die Bleche theils mit H, theils mit O in Berührung sind, so entsteht ein Strom. Villari (1874) nahm statt Platinblechen Palladium, das bekanntlich eine starke Anziehung gegen H besitzt, und erhielt dadurch ein Gaselement, stärker als eine Grove'sche Kette.

515 **Anwendungen der Elektrolyse.** a. **Krystallisirte Metallausscheidungen.** Bringt man in eine Metallsalzlösung ein anderes, positives Metall, so tritt dasselbe häufig substituirend in die Salzverbindung ein und scheidet dadurch an sich selbst kleine Theilchen des Salzmetalles aus; durch die Berührung bilden diese Metalle eine galvanische Kette, in welcher das ausgeschiedene Metall negativ wird, also die Kathode bildet; durch den elektrischen Strom geht nun die Zersetzung des Salzes rasch weiter, und da sich das Salzmetall an die Kathode begibt, so setzt sich Theilchen an Theilchen zu allerlei Figuren zusammen, die man **Metallvegetationen** nennt.

Setzt man einen Zinkstab in Bleizuckerlösung, so bildet sich in dieser Weise der Bleibaum oder Saturnusbaum; durch einen Tropfen Quecksilber in Höllensteinlösung entsteht der Silber- oder Dianenbaum. Stellt man einen Zinkstab in Zinnchlorür, dem etwas Salzsäure zugesetzt wurde, so entsteht krystallinisches Zinn; noch schöner fällt dasselbe aus, wenn man in die Lösung die Platinelektroden einer Batterie bringt; wechselt man die Pole, so verschwinden die Krystallblättchen, tauchen aber bald an der anderen Elektrode auf. Hält man in eine Kupfervitriollösung eine blanke Messerklinge, so läuft dieselbe sofort roth an. — Aehnliche Erscheinungen sind: Taucht man Kupfer für sich allein in Salzwasser, so erhält es eine Oxydrinde; berührt man es aber mit einem Stücke Zink, so wird es neg., stößt also den ebenfalls neg. Sauerstoff ab, während sich das pos. gewordene Zink mit diesem vereinigt. — Reines Zink ist für den Prozeß der Wasserstoffbereitung unbrauchbar, gewöhnlich aber ist es durch Kohle verunreinigt, welche das Zink stark pos. macht, so daß es das neg. O anzieht und dadurch H frei macht; dasselbe geschieht, wenn man reines Zink

mit einem mehr neg. Metall, Silber, Kupfer berührt. — Da Zink durch seine Berührung alle Metalle neg. macht, so reicht eine schwache Verzinkung aus, um Metalle vor der Oxydation zu schützen; dies benutzt man zum Schutze der kupfernen Schiffsbeschläge durch Zinküberzug (galvanisirtes Eisen). Eisen wird in Berührung mit Kupfer pos., rostet also dann leicht; ebenso schreitet das Rosten unaufhaltsam fort, wenn einmal ein Rostfleckchen vorhanden ist, weil Eisen ebenfalls in Berührung mit Rost pos. wird. — Die el. Eigenschaft des Eisens wird durch manche Einflüsse so verändert, daß es seine Stelle in der Spannungsreihe verliert, gegen Kupfer nicht mehr pos., sondern neg. ist; weil dieses Eisen auch nicht mehr auf Salpetersäure und Kupfervitriol zersetzend wirkt, so nennt man es auch passives Eisen. Die Passivität des Eisens wird hervorgerufen durch Eintauchen in conc. Salpetersäure, Jodsäure, Chlorsäure, Bromsäure, durch Glühen desselben an der Luft, und dadurch, daß man es als pos. Elektrode in einen Wasserzersetzungsapparat einführt; da alle diese Vornahmen das Eisen einer verschärften Sauerstoffwirkung aussetzen, und da Eisenoxyduloxyd Salpetersäure u. s. w. nicht angreift, so hält Faraday die Passivität des Eisens in einem dünnen, oft unmerklichen Ueberzuge desselben mit Eisenoxyduloxyd begründet.

b. Nobilis Farbenringe oder die Galvanochromie (1826). Wenn man eine blanke Metallfläche mit dem pos. Pole einer Kette verbindet, dann auf dieselbe eine Lösung von Bleizucker oder von Mangansulfat gießt, und in diese Lösung ohne die Platte zu berühren, einen mit dem neg. Pole der Batterie in Verbindung stehenden Platindraht eintaucht, so bilden sich unter dem Drahtende regenbogenfarbige Ringe, welche die Reihenfolge der Newton'schen Farbenringe zeigen. 516

Diese Ringe entstehen dadurch, daß der an die pos. Elektrode gehende Sauerstoff sich mit dem Bleioxyd zu Bleisuperoxyd verbindet, und daß dieses sich in einer Rinde unter der Drahtspitze absetzt; da die Zersetzung von diesem Punkte aus gleichmäßig nach allen Seiten fortschreitet und die gebildete Rinde immer von neuen Rinden bedeckt wird, so nimmt die Dicke der Abscheidung gleichmäßig nach außen hin ab, zeigt also die Newton'schen Farbenringe für das durchgelassene Licht: gelb, violettroth, mattblau; weiß, gelb, rothviolett; grün, gelb, roth, blau, blaugrün. Nach Becquerel gibt besonders prachtvolle Farben folgendes Verfahren: Feingepulverte Bleiglätte wird in Kalilauge von 1,8 spec. G. gekocht; in diese Flüssigkeit wird die Metallplatte als pos. Pol einer Daniell'schen Batterie von 6 Ketten eingetaucht und ihr gegenüber der Platindraht des neg. Poles befestigt. Man benutzt diese Abscheidung zur metallischen Färbung von metallischen Haushaltungsgegenständen, wie Tischglocken, Fidibusbechern u. s. w. — Die Farben entstehen auch schon, wenn man auf eine Silberplatte essigsaures oder schwefelsaures Kupfer gießt und sie mit der Spitze eines Zinkstabes in der Lösung berührt, weil dann schon durch diese Metalle und die Flüssigkeit der nöthige galvanische Strom entsteht.

c. Galvanische Vergoldung und Versilberung. Taucht man in eine Silber- oder Goldlösung die beiden Pole einer galv. Kette, und befestigt an den neg. Poldraht als Kathode metallische Gegenstände, an die Anode einen Silber- oder Goldstreifen, so wird die Lösung durch den el. Strom zersetzt, ihr Silber oder Gold wird auf den die Kathode bildenden Gegenständen niedergeschlagen, und das Silber oder Gold der Anode wird durch die Einwirkung des Anions aufgelöst und dient so zu erneuten Niederschlägen auf der Kathode, wodurch auf den Gegenständen sich ein Silber- oder Goldüberzug bildet. 517

Wäre der Niederschlag ein rein elektrolytischer, so würde sich das Silber krystallinisch absetzen, also keinen Ueberzug, sondern nur moosförmige, dendritische Figuren bilden; es wird daher der Niederschlag durch eine secundäre Action gebildet. Die hierzu dienlichen Versilberungs- und Vergoldungsflüssigkeiten sind sehr verschieden. Am häufigsten benutzt man Cyansilber (1 Th.), Cyankalium (10 Th.) und 100 Th. Wasser. Durch den el. Strom wird das Cyankalium in Kalium und Cyan zerlegt; das Kalium zersetzt dann das Cyansilber und bildet so einen cohärenten Ueberzug von Silber, während das frei werdende Cyan als Anion sich mit dem Silber an der Anode verbindet. Als Vergoldungsflüssigkeit wendet man eine Mischung von Goldchlorid mit Cyankalium an. Zum Platiniren dient eine Lösung von Platinsalmiak in Wasser. Kupfer, Silber, Bronze, Messing, Neusilber vergolden sich direct, Eisen, Stahl, Zink, Blei, Zinn müssen erst einen Kupfer- oder Silberüberzug erhalten, ehe sie in das Goldbad kommen. Uebrigens müssen alle Stoffe erst besonders für die Versilberung und Vergoldung präparirt, derochirt d. i. von groben Unreinigkeiten befreit, dann decapirt d. i. von den feinsten Oxydhäutchen gereinigt werden, wozu langwierige Arbeiten nöthig sind. Die bekannteste Werkstätte ist die von Christofle, dessen Verfahren von Elkington herrührt. Die galvanischen Metallüberzüge, wie auch Ver-

kupferung, Vernickelung u. s. w. gewinnen in Metallwaarenfabriken aller Art immer mehr Ausbreitung und dies besonders durch die Anwendung der magnet-elektrischen Maschinen. So hat die Anstalt von Wolhill in Hamburg eine Gramme'sche Maschine im Gebrauch, welche in jeder Stunde 10kg Silber niederschlägt.

518 d. Die **Galvanoplastik** (Jacobi und Spencer 1838) ist die Nachbildung von plastischen Bildwerken durch einen el. Niederschlag von Kupfer auf denselben. Als Elektrolyt wird Kupfervitriollösung benutzt, der abzubildende Gegenstand ist an dem neg. Poldrahte befestigt, bildet also die Kathode, auf der sich das Kupfer niederschlägt, und von welcher, wenn sie ein wenig befettet ist, der hinreichend stark gewordene Niederschlag sich loslösen läßt; die Abbildung ist in Vertiefungen und Erhabenheiten umgekehrt wie der Gegenstand; soll sie demselben gleich sein, so muß zuvor eine Matrize von demselben angefertigt werden, was entweder ebenfalls galvanoplastisch oder durch Gypsabguß oder Guttapercha-Abdruck geschieht. Die Anode wird von einer Platte aus Kupfer gebildet, das sich mit dem abgeschiedenen Anion SO_4 zu Kupfervitriol verbindet und so die Lösung constant erhält.

Für kleinere Abbildungen kann die Zersetzungszelle zugleich als galv. Kette dienen, in welcher die Form das neg. und eine eingetauchte Zinkplatte das pos. Metall bildet. In ein irdenes Gefäß wird die Kupfervitriollösung (gesättigte Lösung mit 1/4 Vol. Wasser und etwas Schwefelsäure) gefüllt; in dasselbe taucht ein unten mit Blase verschlossener Glascylinder oder eine Thonzelle, die verdünnte Schwefelsäure enthält und von einem mit dem Gefäße verbundenen Ringarme oder einem durchbohrten, in die Lösung eingesetzten Brette gehalten wird, auf dem Vitriolkrystalle liegen. In die Schwefelsäure taucht ein amalgamirter Zinkstreifen, der durch einen Kupferdraht mit der unter dem Brette, auf dem Boden des Gefäßes liegenden Form verbunden ist; dieser Kupferdraht muß, so weit er in die Flüssigkeit taucht, durch einen nicht leitenden Ueberzug isolirt sein, ebenso alle Theile der Form, die sich nicht abbilden sollen. Für kleine Matrizen benutzt man am besten Guttapercha, die man für einige Augenblicke in heißes Wasser legt, wodurch sie weich wird, und sie dann auf die Patrize drückt. Die so erhaltene Matrize wird mittels einen feinen Pinsels an den abzubildenden Stellen dicht mit Graphitpulver oder Bronzepulver bestäubt, wodurch gleichzeitig die Ablösbarkeit der Nachbildung befördert wird. Auch eine Mischung von Wachs und Gyps oder von Wachs und Stearin kann zur Matrize benutzt werden. Bei galv. Bildwerken im Großen werden einzelne Theile des Modells in Gyps oder einer passenden Mischung abgegossen, diese Theile werden galv. nachgebildet und dann zusammengesetzt. So entstand das Gutenbergdenkmal in Frankfurt (L. v. Kreß) und eine Nachbildung der in Rom stehenden Trajanssäule (Oudry zu Auteuil bei Paris im Auftrage von Napoleon III.). In diesem Etablissement werden eiserne Candelaber, Springbrunnen u. dgl. mit einem galvanoplastischen Kupferüberzuge versehen. Die Firma Christofle, welche bis 1875 schon 12 magnet-elektrische Maschinen von Gramme bezogen hatte, fertigt galvanoplastisch 4—5m hohe Bildsäulen, welche auf den Weltausstellungen als Wunderwerke angestaunt werden. Eine sehr nützliche Anwendung hat die Galvanoplastik zur Nachbildung von Kupferstichplatten, zu Clichés von Holzschnitten u. s. w.; die ursprünglichen Bildwerke würden durch die häufigen Abdrücke rasch abgenutzt werden und daher bald schlechte Bilder liefern; benutzt man sie aber nur zur Herstellung von galvanoplastischen Abdrücken, die dann zum Drucken gebraucht werden, so kann das ursprüngliche Bildwerk sehr lange dienen. Von diesem Mittel, kostbare Originalplatten zu schonen, macht man Anwendung besonders in Landkartenfabriken, Druckereien u. s. w.; die Schriftgießer fertigen von gegossenen Buchstaben, Vignetten u. s. w., galvanoplastische Matrizen, um in denselben den betreffenden Buchstaben neu zu gießen. Die Stereotypplatten werden auf der Druckseite galvanoplastisch mit einer dünnen Kupferschicht versehen, welche ihre Dauerhaftigkeit sehr erhöht; ebenso die Rückseite der Silberglasspiegel. Von der außerordentlichen Genauigkeit, mit welcher das Kupfer die Formen wiedergibt, erhält man einen Beweis durch die galvanoplastische Nachbildung einer Daguerreotypie, welche diese ganz getreu darstellt. Nach Kobells Verfahren kann man galvanoplastisch Platten für Abdrücke in Tuschmanier herstellen; das Bild wird auf einer versilberten Kupferplatte mit einer Farbe aus Ocker und einer Wachslösung in Terpentin gemalt; diese Platte wird dann galvanoplastisch nachgebildet und der Nachguß zu Papierabdrücken benutzt. Dieses Verfahren nennt man **Galvanographie**. Auch eine galvanische Aetzmanier hat Osann ersonnen, die **Galvanokaustik** genannt wird.

Wie das galvanische Glühen, das elektrische Kohlenlicht, die Galvanoplastik und die galvanischen Metallniederschläge durch die magnet-elektrische Maschine erweiterte Anwendung

gewannen, so wird die chemische Wirkung des elektrischen Stromes durch diese Maschinen erst zu rechter Bedeutung gelangen, besonders wenn es möglich ist, die öfter eintretende Umkehrung des Maschinenstromes zu verhindern, so zur Reindarstellung der Metalle aus ihren Salzen und Erzen, zur Erzeugung von Ozon zum Bleichen und für medicinische Zwecke u. s. w.

5. Die mechanische Wirkung des el. Stromes (Quincke 1863). Bringt man in eine wenig geneigte enge Glasröhre zwischen zwei eingeschmolzene Platindrähte einen kleinen Flüssigkeitsfaden und läßt dann den el. Strom mittels der 2 Platindrähte durch denselben gehen, so wird derselbe, wenn der pos. Strom aufwärts geht, mit dem pos. Strome fortgeführt und demnach ein wenig gehoben; nur eine gewisse Sorte von Alkohol und Terpentinöl gehen unter Umständen mit dem neg. Strome. Die Steighöhe zeigt sich proportional der Stromstärke, proportional dem Querschnitte der Röhre, also umgekehrt proportional dem Leitungswiderstande der Flüssigkeit; bei gut leitenden Flüssigkeiten z. B. bei Salzlösungen ist sie verschwindend klein. Sind in der Flüssigkeit kleine Theilchen, z. B. Stärkemehlkörnchen suspendirt, so bewegen sie sich bei starkem Strome in der Richtung der neg. El., bei schwachem Strome aber am Rande in positiver, in der Mitte in neg. Richtung. Quincke erklärt diese Bewegungen dadurch, daß in dem reinen Wasserfaden die Theilchen pos. el., und deßhalb von dem pos. Strome fortgeführt würden, daß dagegen suspendirte Theilchen durch Contact mit dem Wasser neg. El. annähmen, und daher von dem neg. Strome fortgestoßen würden. Eine ähnliche Erscheinung ist die el. Endosmose, d. i. das Fortströmen einer Flüssigkeit durch eine poröse Scheidewand, wenn ein el. Strom durch die Flüssigkeit geht, wodurch z. B. im Daniell'schen elektrolytischen Apparat die Flüssigkeit an der Kathode sich vermehrt, und hiernach ein Fortströmen mit dem pos. Strome anzeigt; da die Gesetze dieser Strömung ganz mit denen von Quinckes Rohr übereinstimmen, so ist diese Erscheinung nichts anderes, als das Fortströmen durch viele Capillarröhren. Eine umgekehrte Erscheinung ist das Entstehen eines el. Stromes, wenn reines Wasser durch eine poröse Scheidewand geht; diese von Quincke (1858) entdeckten Diaphragmenströme erklärt Wüllner als eine Folge des Contactes der Flüssigkeit mit der porösen Scheidewand. Nach Zöllners Versuchen (1872) sind alle strömenden Bewegungen in Flüssigkeiten, besonders wenn dieselben theilweise mit starren Körpern in Berührung stehen, von elektrischen Strömen (Strömungsströmen) begleitet, die vorwiegend die Richtung der strömenden Flüssigkeit zu haben scheinen. Andere mechanische Wirkungen des Stromes sind das Abnehmen der Festigkeit und des Leitungswiderstandes eines Kupferdrahtes, der lange als Stromleiter gedient hat, sowie das Abnehmen der Festigkeit und der Elasticität während des Stromdurchganges, welche jedoch nach Edlund (1867) und Streintz (1873) nur der entwickelten Wärme zu verdanken sind, während die schon von Wertheim bemerkte Verlängerung der Drähte nach denselben Forschern die der Wärme übersteigt.

4. Wirkungen des elektrischen Stromes.

b. In die Ferne.

Die Fernewirkungen des el. Stromes sind 1. dynamische Wirkungen, 2. magn. Wirkungen, 3. el. oder Inductionswirkungen. Die dynamischen d. i. bewegenden Wirkungen bestehen darin, daß el. Ströme auf einander und auf den Magnet einen bewegenden Einfluß ausüben; diesen Theil der Lehre vom Galvanismus nennt man auch die Elektrodynamik; dieselbe enthält die anziehende und abstoßende Wirkung el. Ströme auf einander, die Wirkung von Magneten auf el. Ströme, die Ampère'sche Theorie des Magnetismus und die Wirkung von el. Strömen auf Magnete.

1. Die Elektrodynamik. a. Anziehung und Abstoßung el. Ströme gegen einander (Ampère 1820). Für el. Ströme bestehen Grundgesetze, analog denjenigen des Magnetismus und der Elektricität: 1. Parallele gleich gerichtete Ströme ziehen einander an, parallele entgegengesetzt gerichtete Ströme stoßen einander ab. 2. Nicht parallele Ströme, die nach einem Punkte hin oder von einem Punkte weg laufen, ziehen einander an; geht dagegen der eine nach einem Punkte hin, von welchem der andere weg geht, so stoßen sie einander ab.

Zum Nachweise dieser Gesetze dient das Ampère'sche Gestell. Die beiden Klemmschrauben für die Poldrähte einer Batterie befinden sich an dem Fuße zweier auf einer

kupferung, Vernickelung u. s. w. gewinnen in Metallwaarenfabriken aller Art immer mehr Ausbreitung und dies besonders durch die Anwendung der magnet-elektrischen Maschinen. So hat die Anstalt von Wolhill in Hamburg eine Gramme'sche Maschine im Gebrauch, welche in jeder Stunde 10kg Silber niederschlägt.

518 d. Die Galvanoplastik (Jacobi und Spencer 1838) ist die Nachbildung von plastischen Bildwerken durch einen el. Niederschlag von Kupfer auf denselben. Als Elektrolyt wird Kupfervitriollösung benutzt, der abzubildende Gegenstand ist an dem neg. Poldrahte befestigt, bildet also die Kathode, auf der sich das Kupfer niederschlägt, und von welcher, wenn sie ein wenig befettet ist, der hinreichend stark gewordene Niederschlag sich loslösen läßt; die Abbildung ist in Vertiefungen und Erhabenheiten umgekehrt wie der Gegenstand; soll sie demselben gleich sein, so muß zuvor eine Matrize von demselben angefertigt werden, was entweder ebenfalls galvanoplastisch oder durch Gypsabguß oder Guttapercha-Abdruck geschieht. Die Anode wird von einer Platte aus Kupfer gebildet, das sich mit dem abgeschiedenen Anion SO_4 zu Kupfervitriol verbindet und so die Lösung constant erhält.

Für kleinere Abbildungen kann die Zersetzungszelle zugleich als galv. Kette dienen, in welcher die Form das neg. und eine eingetauchte Zinkplatte das pos. Metall bildet. In ein irdenes Gefäß wird die Kupfervitriollösung (gesättigte Lösung mit 1/4 Vol. Wasser und etwas Schwefelsäure) gefüllt; in dasselbe taucht ein unten mit Blase verschlossener Glascylinder oder eine Thonzelle, die verdünnte Schwefelsäure enthält und von einem mit dem Gefäße verbundenen Ringarme oder einem durchbohrten, in die Lösung eingesetzten Brette gehalten wird, auf dem Vitriolkrystalle liegen. In die Schwefelsäure taucht ein amalgamirter Zinkstreifen, der durch einen Kupferdraht mit der unter dem Brette, auf dem Boden des Gefäßes liegenden Form verbunden ist; dieser Kupferdraht muß, so weit er in die Flüssigkeit taucht, durch einen nicht leitenden Ueberzug isolirt sein, ebenso alle Theile der Form, die sich nicht abbilden sollen. Für kleine Matrizen benutzt man am besten Guttapercha, die man für einige Augenblicke in heißes Wasser legt, wodurch sie weich wird, und sie dann auf die Patrize drückt. Die so erhaltene Matrize wird mittels einen feinen Pinsels an den abzubildenden Stellen dicht mit Graphitpulver oder Bronzepulver bestäubt, wodurch gleichzeitig die Ablösbarkeit der Nachbildung befördert wird. Auch eine Mischung von Wachs und Gyps oder von Wachs und Stearin kann zur Matrize benutzt werden. Bei galv. Bildwerken im Großen werden einzelne Theile des Modells in Gyps oder einer passenden Mischung abgegossen, diese Theile werden galv. nachgebildet und dann zusammengesetzt. So entstand das Gutenbergdenkmal in Frankfurt (L. v. Kreß) und eine Nachbildung der in Rom stehenden Trajanssäule (Oudry zu Auteuil bei Paris im Auftrage von Napoleon III.). In diesem Etablissement werden eiserne Candelaber, Springbrunnen u. dgl. mit einem galvanoplastischen Kupferüberzuge versehen. Die Firma Christofle, welche bis 1875 schon 12 magnet-elektrische Maschinen von Gramme bezogen hatte, fertigt galvanoplastisch 4—5m hohe Bildsäulen, welche auf den Weltausstellungen als Wunderwerke angestaunt werden. Eine sehr nützliche Anwendung hat die Galvanoplastik zur Nachbildung von Kupferstichplatten, zu Clichés von Holzschnitten u. s. w.; die ursprünglichen Bildwerke würden durch die häufigen Abdrücke rasch abgenutzt werden und daher bald schlechte Bilder liefern; benutzt man sie aber nur zur Herstellung von galvanoplastischen Abdrücken, die dann zum Drucken gebraucht werden, so kann das ursprüngliche Bildwerk sehr lange dienen. Von diesem Mittel, kostbare Originalplatten zu schonen, macht man Anwendung besonders in Landkartenfabriken, Druckereien u. s. w.; die Schriftgießer fertigen von gegossenen Buchstaben, Vignetten u. s. w., galvanoplastische Matrizen, um in denselben den betreffenden Buchstaben neu zu gießen. Die Stereotypplatten werden auf der Druckseite galvanoplastisch mit einer dünnen Kupferschicht versehen, welche ihre Dauerhaftigkeit sehr erhöht; ebenso die Rückseite der Silberglasspiegel. Von der außerordentlichen Genauigkeit, mit welcher das Kupfer die Formen wiedergibt, erhält man einen Beweis durch die galvanoplastische Nachbildung einer Daguerreotypie, welche diese ganz getreu darstellt. Nach Kobells Verfahren kann man galvanoplastisch Platten für Abdrücke in Tuschmanier herstellen; das Bild wird auf einer versilberten Kupferplatte mit einer Farbe aus Ocker und einer Wachslösung in Terpentin gemalt; diese Platte wird dann galvanoplastisch nachgebildet und der Nachguß zu Papierabdrücken benutzt. Dieses Verfahren nennt man Galvanographie. Auch eine galvanische Aetzmanier hat Osann ersonnen, die Galvanokaustik genannt wird.

Wie das galvanische Glühen, das elektrische Kohlenlicht, die Galvanoplastik und die galvanischen Metallniederschläge durch die magnet-elektrische Maschine erweiterte Anwendung

gewannen, so wird die chemische Wirkung des elektrischen Stromes durch diese Maschinen erst zu rechter Bedeutung gelangen, besonders wenn es möglich ist, die öfter eintretende Umkehrung des Maschinenstromes zu verhindern, so zur Reindarstellung der Metalle aus ihren Salzen und Erzen, zur Erzeugung von Ozon zum Bleichen und für medicinische Zwecke u. s. w.

519 5. Die mechanische Wirkung des el. Stromes (Quincke 1863). Bringt man in eine wenig geneigte enge Glasröhre zwischen zwei eingeschmolzene Platindrähte einen kleinen Flüssigkeitsfaden und läßt dann den el. Strom mittels der 2 Platindrähte durch denselben gehen, so wird derselbe, wenn der pos. Strom aufwärts geht, mit dem pos. Strome fortgeführt und demnach ein wenig gehoben; nur eine gewisse Sorte von Alkohol und Terpentinöl gehen unter Umständen mit dem neg. Strome. Die Steighöhe zeigt sich proportional der Stromstärke, proportional dem Querschnitte der Röhre, also umgekehrt proportional dem Leitungswiderstande der Flüssigkeit; bei gut leitenden Flüssigkeiten z. B. bei Salzlösungen ist sie verschwindend klein. Sind in der Flüssigkeit kleine Theilchen, z. B. Stärkemehlkörnchen suspendirt, so bewegen sie sich bei starkem Strome in der Richtung der neg. El., bei schwachem Strome aber am Rande in positiver, in der Mitte in neg. Richtung. Quincke erklärt diese Bewegungen dadurch, daß in dem reinen Wasserfaden die Theilchen pos. el., und deßhalb von dem pos. Strome fortgeführt würden, daß dagegen suspendirte Theilchen durch Contact mit dem Wasser neg. El. annähmen, und daher von dem neg. Strome fortgestoßen würden. Eine ähnliche Erscheinung ist die el. Endosmose, d. i. das Fortströmen einer Flüssigkeit durch eine poröse Scheidewand, wenn ein el. Strom durch die Flüssigkeit geht, wodurch z. B. im Daniell'schen elektrolytischen Apparat die Flüssigkeit an der Kathode sich vermehrt, und hiernach ein Fortströmen mit dem pos. Strome anzeigt; da die Gesetze dieser Strömung ganz mit denen von Quinckes Rohr übereinstimmen, so ist diese Erscheinung nichts anderes, als das Fortströmen durch viele Capillarröhren. Eine umgekehrte Erscheinung ist das Entstehen eines el. Stromes, wenn reines Wasser durch eine poröse Scheidewand geht; diese von Quincke (1858) entdeckten Diaphragmenströme erklärt Wüllner als eine Folge des Contactes der Flüssigkeit mit der porösen Scheidewand. Nach Zöllners Versuchen (1872) sind alle strömenden Bewegungen in Flüssigkeiten, besonders wenn dieselben theilweise mit starren Körpern in Berührung stehen, von elektrischen Strömen (Strömungsströmen) begleitet, die vorwiegend die Richtung der strömenden Flüssigkeit zu haben scheinen. Andere mechanische Wirkungen des Stromes sind das Abnehmen der Festigkeit und des Leitungswiderstandes eines Kupferdrahtes, der lange als Stromleiter gedient hat, sowie das Abnehmen der Festigkeit und der Elasticität während des Stromdurchganges, welche jedoch nach Edlund (1867) und Streintz (1873) nur der entwickelten Wärme zu verdanken sind, während die schon von Wertheim bemerkte Verlängerung der Drähte nach denselben Forschern die der Wärme übersteigt.

4. Wirkungen des elektrischen Stromes.

b. In die Ferne.

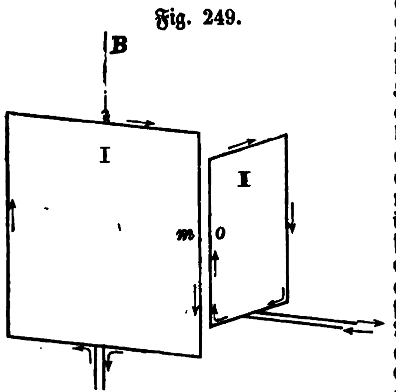
520 Die Fernewirkungen des el. Stromes sind 1. dynamische Wirkungen, 2. magn. Wirkungen, 3. el. oder Inductionswirkungen. Die dynamischen d. i. bewegenden Wirkungen bestehen darin, daß el. Ströme auf einander und auf den Magnet einen bewegenden Einfluß ausüben; diesen Theil der Lehre vom Galvanismus nennt man auch die Elektrodynamik; dieselbe enthält die anziehende und abstoßende Wirkung el. Ströme auf einander, die Wirkung von Magneten auf el. Ströme, die Ampère'sche Theorie des Magnetismus und die Wirkung von el. Strömen auf Magnete.

1. Die Elektrodynamik. a. Anziehung und Abstoßung el. Ströme gegen einander (Ampère 1820). Für el. Ströme bestehen Grundgesetze, analog denjenigen des Magnetismus und der Elektricität: 1. Parallele gleich gerichtete Ströme ziehen einander an, parallele entgegengesetzt gerichtete Ströme stoßen einander ab. 2. Nicht parallele Ströme, die nach einem Punkte hin oder von einem Punkte weg laufen, ziehen einander an; geht dagegen der eine nach einem Punkte hin, von welchem der andere weg geht, so stoßen sie einander ab.

Zum Nachweise dieser Gesetze dient das Ampère'sche Gestell. Die beiden Klemmschrauben für die Poldrähte einer Batterie befinden sich an dem Fuße zweier auf einer

Bodenplatte stehenden aber von einander isolirten Metallstäbe, die sich oben wagrecht umbiegen und an ihren Enden Quecksilbernäpfe tragen. Ist nun ein Draht in die Form eines Rechteckes (Fig. 249) so gebogen, daß seine beiden Enden in diese Quecksilbernäpfe eingehängt werden können, so geht durch dieses drehbare Rechteck I ein el. Strom, der mittels eines in einen der Poldrähte eingeschalteten Stromwechslers nach Belieben geschlossen, geöffnet und umgekehrt werden kann. Die Poldrähte einer zweiten Batterie gehen an die Klemmschrauben eines zweiten, nicht drehbaren, aber auch nicht fest aufgestellten, sondern leicht handlich in alle Lagen zu bringenden Drahtrechteckes II, welches demnach ebenfalls von einem el. Strome durchflossen ist. Da leicht festgestellt werden kann, in welcher Richtung der pos. Strom in jeder Seite der beiden Rechtecke sich bewegt, so kann auch leicht eine Seite des festen Rechteckes parallel zu einer Seite des drehbaren Rechteckes in einiger Entfernung von dieser so aufgestellt werden, daß der Strom in beiden gleiche Richtung hat; dann nimmt das letztere Rechteck eine solche Drehung an, daß die parallelen Seiten so nahe als möglich beisammen stehen, wodurch der erste Theil des ersten Satzes nachgewiesen ist, was man indeß noch vielfältig verändert vornehmen kann. Wechselt man den Strom, wenn die beiden parallelen Drähte in größter Nähe stabil beisammen stehen, so dreht sich plötzlich das drehbare Rechteck so, daß die beiden in Betracht gezogenen Seiten sich soweit als möglich von einander entfernen. Auch hier läßt sich der Nachweis mannigfaltig verändern, besonders wenn man das zweite Rechteck in die Hand nimmt und mit einer Seite desselben eine der drehbaren verfolgt. Noch deutlicher werden die Versuche, wenn man statt des drehbaren Rechteckes einen drehbaren astatischen Leiter in die Quecksilbernäpfe hängt, weil dieser nicht wie ein einfaches Rechteck durch den Erdmagnetismus in einer bestimmten Lage festgehalten wird. Leicht ist auch das zweite Gesetz nachzuweisen, da man ja das handliche Rechteck in jeder beliebigen Lage festhalten, also auch so stellen kann, daß es mit einer Seite des drehbaren Rechteckes einen beliebigen Winkel macht, und daß die Ströme beide nach dem Scheitel dieses Winkels hin, oder beide von dem Scheitel weg, oder auch theils nach demselben hin, theils von ihm weglaufen. Für die Anziehung gleichgerichteter paralleler Ströme gibt es mehrere Apparate; so Buffs Bandspirale, die auch zum Nachweise der Abstoßung dienen kann; von zwei mit einem isolirenden Stoffe überzogenen Streifen von Kupferblech ist jeder zu einer Spirale zusammengewunden und mit den freien Enden so aufgehängt, daß leicht ein Strom durchgeleitet werden kann und daß die zwei Spiralscheiben sich in nicht großer Entfernung von einander befinden. Dann Petrinas Spirale, die aus Kupferdraht, zu einer schraubenartigen Spirale gewunden, besteht; das eine Ende ist in einen Messingständer, der die eine Klemme trägt, befestigt, das andere Ende taucht in ein Quecksilbernäpfchen, das die zweite Klemme trägt. Da die Windungen parallel sind, so ziehen sie einander an, wodurch das zweite Ende aus dem Quecksilber gehoben und hiermit der Strom geöffnet wird; hierdurch hört die Anziehung auf, die Windungen entfernen sich von einander, das Ende taucht wieder ein und der Strom schließt sich wieder; es ist leicht ersichtlich, daß durch diese selbstthätige Wechselwirkung die Spirale in eine abwechselnd zusammenziehende und ausdehnende Bewegung geräth.

Fig. 249.



Die Anziehung und Abstoßung der Ströme ist proportional dem Product der Intensitäten der beiden Ströme und dem Product der auf einander wirkenden Stromlängen, sowie umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung. (Elektrodynamisches Grundgesetz).

Dieses Gesetz wurde von Weber (1846) mittels des Elektrodynamometers nachgewiesen. Dieses besteht aus einer Bifilarrolle, d. i. einer an den 2 Leitungsdrähten aufgehängten Spule, um welche der übersponnene Leitungsdraht mehrere Tausendmal herumgewunden ist, und über welcher der Ablesungsspiegel befestigt ist, und aus der feststehenden Multiplicatorrolle, einer Spule, die ebenfalls mehrere Tausende Drahtwindungen trägt. Dem Apparat gegenüber steht, wie bei jeder Spiegelablesung ein Fernrohr mit Fadenkreuz und Scala, die man in dem Spiegel sieht. Aus den Grundgesetzen ergeben sich folgende wichtige Folgerungen:

1. **Gekreuzte Ströme suchen sich parallel zu stellen**; denn laufen in dem einen Winkel der Kreuzung die beiden Ströme nach dem Scheitel hin, so laufen sie in dem Scheitelwinkel von demselben weg; also wirken die Ströme nach dem ersten Theile des zweiten Grundgesetzes dahin, die Schenkel dieser Winkel einander zu nähern, die Winkel = 0 zu machen. In den 2 anderen Winkeln, den Nebenwinkeln der eben betrachteten, läuft in einem Schenkel der Strom zum Scheitel, im anderen von demselben weg; also wirken die Ströme nach dem zweiten Theile des zweiten Grundgesetzes dahin, die beiden Schenkel von einander zu entfernen, diese Nebenwinkel also = 180°, die ersten Winkel ebenfalls = 0 zu machen. An Ampères Gestell ist dieser Satz leicht nachzuweisen. 2. **Hinter einander liegende Theile eines und desselben Stromes stoßen einander ab**; denn diese Theile treffen sich in einem Punkte, nach welchem der eine Theil hin, von welchem der andere aber wegläuft. Nachgewiesen wird dieser Satz mittels Ampères **Bügel**. Ein Holztrog ist durch eine Glaswand in zwei Abtheilungen getheilt, die mit Quecksilber gefüllt sind, in das die 2 Poldrähte tauchen und auf dem ein Bügel von Eisendraht schwimmt; beim Schließen des Stromes bewegt sich derselbe von einem Ende des Apparates zum anderen. 3. **Geht ein begrenzter Strom zu einem unbegrenzten hin oder von demselben weg, so wird der Stromleiter längs desselben fortbewegt**, und zwar im ersten Falle gegen, im zweiten mit der Stromrichtung. Denn jedes Element des ersten Stromes wird, wenn er nach dem zweiten hingeht, von jedem Element des zweiten, das nach dem Convergenzpunkt hingerichtet ist, angezogen, also wird der erste Strom von der einen Seite des zweiten angezogen und von der anderen abgestoßen, muß sich also nach der ersten Seite hinbewegen. Zum Nachweise dient ein **elektrodynamischer Rotationsapparat**. In dem Mittelpunkte einer mit Quecksilber gefüllten Kreisrinne steht eine Säule, die oben mit einem Quecksilbernäpfchen endigt; auf diesem schwebt mittels einer Spitze ein zweimal rechtwinklig umgebogener Kupferdraht, dessen Enden in die Rinne tauchen. Der Strom geht von einer Klemme durch einen mehrmals um die Rinne gewundenen Kupferdraht, dann in das Quecksilber über den schwebenden Draht zu demselben zurück zu der anderen Klemme. Der umwindende Kupferdraht bildet den unbegrenzten, der schwebende den begrenzten Strom, der sich längs des ersteren fortbewegen und daher um die Säule rotiren muß. 4. **Zwei Solenoide**, d. i. schraubenartig gewundene Drahtspiralen, **stoßen sich an den 2 Enden ab, in denen die Ströme beide die Richtung der Uhrzeiger oder beide die entgegengesetzte Richtung haben, sie ziehen sich aber an zwei Enden an, wenn in dem einen Strome die Uhrzeigerrichtung, im anderen die entgegengesetzte herrscht.** Denn werden 2 Enden der ersten Art einander parallel gegenüber gestellt, so sind die parallelen Ströme einander entgegengesetzt wie an zwei Uhren, deren Zifferblätter einander parallel gegenüber stehen, die Zeiger entgegengesetzt gerichtete Kreise beschreiben; folglich müssen sich jene Enden einander abstoßen. Dasselbe findet aber auch statt, wenn diese Enden, die man wohl gleichnamig nennen kann, neben einander liegen, weil alsdann die einander nahe stehenden Stromtheile entgegengesetzte Richtung haben, gerade so wie an zwei neben einander stehenden Zifferblättern in den zwei benachbarten Halbkreisen die Bewegung der Zeiger entgegengesetzt ist. Verfolgt man in ähnlicher Weise die mannigfaltigen hier noch möglichen Fälle, so gelangt man leicht zu den angeführten Sätzen, die an dem Ampère'schen Gestelle mittels eines drehbar aufgehängten und mittels eines festen, aber handlichen Solenoides nachgewiesen werden. Nennt man Enden mit gleichen Strombrehrichtungen gleichnamig, und solche mit ungleichen Drehrichtungen ungleichnamig, so läßt sich der Satz kurz so aussprechen: **Gleichnamige Solenoidenden stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen einander an.** Da hierin ein Solenoid mit einem Magnet Uebereinstimmung zeigt, so liegt es nahe, die Einwirkung von Magneten auf Solenoide und andere Stromformen näher zu untersuchen, und da die Erde der größte Magnet ist, zuerst die Wirkung der Erde auf bewegliche Stromleiter zu betrachten.

b. Die Wirkung von Magneten auf elektrische Ströme. Ein auf dem **Ampère**'schen Gestelle aufgehängter rechteckiger oder kreisförmiger, von einem Strome durchflossener Stromdrahtleiter stellt sich senkrecht zu dem magnetischen Meridian, also ostwestlich, und zwar so, daß der positive Strom in der unteren Windung von Osten nach Westen fließt, oder daß in dem ganzen Leiter, von Süden betrachtet, der positive Strom in der Richtung der Uhrzeiger kreist. **521**

Den einfachsten Versuch bietet die **schwimmende Batterie von Delarive**, bestehend aus einem großen Korkstücke, in welches eine Kupfer- und eine Zinkplatte eingesetzt sind, deren obere aus dem Korke herausragende Enden durch mehrere kreisförmige Kupferdrahtwindungen verbunden sind. Setzt man den Kork in Wasser, so entsteht ein Strom in dem Drahte, und der Draht stellt sich ostwestlich, senkrecht zu dem magnetischen Meridian.

Weil demnach ein einfacher drehbarer Leitungsdraht in seiner ostwestlichen Stellung durch die Erdkraft festgehalten wird, so sind solche Drähte bei den Versuchen am Ampère'schen Gestelle nicht so leicht beweglich, als solche Drähte, die man von der Erde unabhängig gemacht hat, und die man astatische Leitungsdrähte nennt. Ein solcher wird z. B. in Rechteckform erhalten, wenn man die untere Seite schon in der Mitte wieder aufwärts biegt bis zu dem oberen ersten Knie, sie dann wagrecht in gleicher Länge weiter führt, dann abwärts biegt, dann unten zu der Mitte hingehen läßt und da abermals aufwärts biegt bis unter die erste Spitze, wo das umgebogene zweite Ende des Drahtes die zweite Spitze bildet. — Mehrere kreisförmige Leitungsdrähte parallel hinter einander an einem gemeinsamen leitenden Halter befestigt, stellen sich sämmtlich ostwestlich, die ganze Reihe daher in die Richtung des Meridians.

Ein horizontal drehbares Solenoid stellt sich mit seiner Achse in den magnetischen Meridian des Ortes, das eine Ende nach Norden, das andere nach Süden gerichtet. Nennt man das erste den Nordpol, das letzte den Südpol, so kreisen am Südpole die Ströme wie die Uhrzeiger, am Nordpole entgegengesetzt wie die Uhrzeiger. Ein horizontal drehbares Solenoid stellt sich also wie eine Declinationsnadel; kann es sich auch in verticaler Richtung drehen, so senkt sich der Nordpol nach unten, es stellt sich wie eine Inclinationsnadel. Wie nun ein Stromleiter und ein Solenoid von dem Magnet Erde eine Richtkraft erfahren, so werden sie auch von jedem anderen Magnet abgelenkt und zwar so, daß die Nordpole eines Magnetes und eines Solenoides, sowie auch die Südpole eines Magnetes und eines Solenoides einander abstoßen, daß dagegen ein Pol eines Magnetes und der ungleichnamige eines Solenoides einander anziehen. Ganz dasselbe findet auch für eine einzige Windung statt, die man als ein sehr kurzes Solenoid auffassen kann; auch diese wird von einem Magnetpole auf der einen Seite angezogen, auf der anderen abgestoßen.

Besonders deutlich werden alle diese Erscheinungen bei eingeschaltetem Stromwechsler, weil sie sich bei jeder Umkehrung des Stromes ebenfalls umkehren; z. B. eine Drahtwindung und ein Solenoid drehen sich ganz um, nehmen die entgegengesetzte Stellung beim Stromwechsel ein; ein Solenoidpol, der eben noch von dem Nordpole eines Magnetes angezogen wurde, wird nach dem Stromwechsel von demselben abgestoßen; ein Solenoid erfährt also durch den Stromwechsel auch eine Vertauschung der Pole. — Die große Uebereinstimmung zwischen Magneten und Solenoiden führte zu

522 c. Ampères Theorie des Magnetismus (Ampère 1826, Weber 1846). Die letzten Abschnitte ergeben, daß Solenoide auf einander wirken wie Magnete; die Wirkung ist aber nicht blos der Art, sondern auch dem Gesetze nach dieselbe, denn sie ist wie die Wirkung zweier Magnetpole dem Product der Intensitäten direct und dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional. Außerdem wirken Magnete auf Solenoide wie auf Magnete, und zwar ebenfalls sowohl der Art als auch dem Gesetze nach; und endlich ist schon aus früheren Betrachtungen bekannt, daß Drahtwindungen, also auch Solenoide auf Magnetnadeln wirken wie Magnete. Demnach haben die Solenoide so große Uebereinstimmung mit Magneten, daß Ampère zu der Folgerung veranlaßt wurde, die Magnete seien nichts anderes als Solenoide: der Magnetismus ist ein Parallelismus elektrischer Ströme. Indessen konnte Ampère doch nicht annehmen, daß ein Magnetstab als Ganzes von großen el. Strömen umkreist sei; denn ein großer Magnet läßt sich bekanntlich in unzählige kleine aber vollständige Magnete zerlegen, während ein Solenoid sich nur in kleine Drahtstücke, nicht aber in kleine Solenoide zerlegen läßt. Außerdem hat ein Solenoid seine Pole an den Enden, ein Magnet aber etwas abwärts von den Enden nach der Mitte zu; ein Solenoid wirkt nur an den Endflächen, nicht aber an den Seiten, während ein Magnet auch an den Seiten eine nach der Mitte hin abnehmende Wirkung besitzt. Diese Unterschiede gaben Ampères Theorie des Magnetismus folgende Gestalt: Ein Magnet besteht aus Molekularmagneten, deren Magnetismus darin seinen Grund hat, daß sie von parallelen el. Strömen, sogenannten Elementarströmen, umkreist sind. So lange die Elementarströme der verschiedenen Mole-

kularmagnete noch nicht parallel und gleich gerichtet sind, so lange ist der Körper noch kein Magnet; sind aber diese Elementarströme durch Drehung der Molekularmagnete einander parallel und gleich gerichtet, so ist der Körper ein Magnet; sein Südpol liegt an dem Ende, wo diese Ströme die Richtung der Uhrzeiger haben, der Nordpol an dem anderen Ende. Da demnach in einem Magnet die hinter einander liegenden Molekularmagnete lange linienförmige Solenoide bilden, die ihren Zusammenhalt durch die Anziehung der parallelen Ströme erhalten, sich aber an ihren gleichnamigen Enden einander abstoßen, so werden jene Linien an den Enden eines Stabes nach Außen gekrümmt, wodurch ein Theil ihrer Pole von den Stirnflächen des Magnetstabes an die Seitenflächen hingedreht wird; hierdurch erklärt sich die Verschiebung der Magnetpole von den Enden weg, die allmälige Abnahme der magnetischen Anziehung von den Polen nach der Mitte zu, die Indifferenzzone, und die durch van Rees gefundene stärkere Polarität der mittleren Schichten des Magnetes.

Die anziehende und abstoßende Wirkung zweier Magnete ist demnach nichts anderes als die anziehende Wirkung gleich gerichteter und die abstoßende Wirkung entgegengesetzt gerichteter Ströme. An einer Stirnfläche eines Magnetes haben die Elementarströme der Stirnflächen sämmtlicher Molekularmagnete gleiche Richtung, wirken daher alle in demselben Sinne nach außen wie eine einzige große Solenoidwindung, und wirken demnach auf andere Magnetstirnflächen wie zwei Solenoidenden auf einander; und da deren anziehende und abstoßende Wirkung aus der Anziehung und Abstoßung der el. Ströme hervorgeht, so ist auch die der Magnetpole auf diese Eigenschaft der el. Ströme zurückgeführt. Zwei frei bewegliche Magnete wirken demgemäß so auf einander, daß die in ihnen supponirten Ströme parallel werden; leicht ist dies aus den Fig. 250—252 zu ersehen, in welchen bei A überall ungleichnamige Pole mit gleich gerichteten Strömen und

Fig. 250.

Fig. 251.

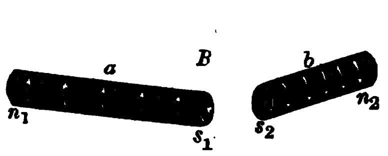


Fig. 252.

bei B gleichnamige Pole mit entgegengesetzten Strömen auf einander wirken, und welche alle denkbaren Stellungen von Magneten gegen einander darstellen. Ein fester Magnet hat auf einen beweglichen die Wirkung, dessen gleichgerichtete Ströme so nahe und so parallel als möglich zu stellen. Da man jede magn. Wirkung auf Ströme zurückzuführen sucht, so erklärt man auch die magn. Wirkung der Erde durch el. Ströme, die von Osten nach Westen etwa gleichlaufend mit dem magn. Aequator die Erde umkreisen. Demgemäß muß eine frei aufgehängte Stromwindung sich so drehen, daß in ihrer unteren Seite der Strom ebenfalls von Osten nach Westen geht; denn der Erdstrom wirkt zwar, da er von der unteren

und der oberen Seite nahe gleich weit entfernt ist, auf diese beiden Ströme in gleicher aber entgegengesetzter Stärke, wodurch diese Wirkung sich aufhebt. Er ertheilt aber nach dem Satze über begrenzte und unbegrenzte Ströme dem aufsteigenden Strome eine Bewegung nach Westen und dem absteigenden eine solche nach Osten, wodurch die Windung westöstlich gestellt wird, und zwar so, daß der Strom unten von Osten nach Westen geht. Verstärkt tritt diese Wirkung der Erdströme bei Solenoiden und demnach auch bei Magneten auf; sie stellen ihre einzelnen Windungen westöstlich und daher sich selbst nordsüdlich. Die Ursache der Erdströme kann vielleicht in der westöstlich wandernden Berührungsstelle der kälteren Nachthälfte mit der wärmeren Tageshälfte der Erde gesucht werden, ebenso wie die Variationen des Erdmagnetismus sich dann durch Wärmeänderungen der Erde erklären; nach Zöllner sind sie Strömungsströme des feurig-flüssigen Erdinnern (s. 591.).

523 d. **Die Wirkung von el. Strömen auf Magnete** besteht bekanntlich darin, daß ein frei beweglicher Magnet sich auf den Strom senkrecht stellt, und zwar so, daß der Nordpol die Stelle links vom el. Strome einnimmt. Die hierauf beruhenden Apparate, wie Galvanometer, Boussolen u. s. w. sind schon in 498. betrachtet worden.

Hier ist nur noch die Erklärung dieser Erscheinung nach Ampères Theorie anzugeben. Da eine Magnetnadel als ein Solenoid betrachtet werden kann, in welchem an der Stelle des Nordpoles die Ströme entgegengesetzt wie die Uhrzeiger kreisen, so ist zunächst die Wirkung eines Stromes auf eine Stromwindung ins Auge zu fassen, deren dem Strome zu- und abgewendete Seite nicht gleich weit von demselben entfernt sind, wie es für den Erdstrom angenommen werden mußte; die Wirkung auf die zugewendete Seite ist dann stärker als auf die abgewendete, folglich muß die zugewendete Seite und mit ihr die abgewendete sich dem Strome parallel stellen, und zwar so, daß in der zugewendeten Seite der Strom dieselbe Richtung hat. Dahin wirken aber auch die aufsteigende und die absteigende Seite; denn die erstere wird nach dem Satze über begrenzte und unbegrenzte Ströme dem Strome entgegen, die letzte mit dem Strome fortbewegt; beide suchen sich also in der Richtung des Stromes soweit als möglich von einander zu entfernen, was der Fall ist, wenn ihre Ebene in die Stromrichtung fällt. Eine Stromwindung stellt sich also einem nahen Strome parallel und zwar so, daß in ihrer nächsten Seite der Strom eine zu dem nahen Strome gleiche Richtung hat. Ganz in derselben Weise stellen sich alle Elementarströme eines Magnetes gegen einen Strom, sie stellen sich demselben sämmtlich parallel, und stellen daher ihre Achsenrichtung auf denselben senkrecht, womit Oersteds Gesetz erklärt ist. Geht nun z. B. der Strom wagrecht von rechts nach links, und befindet sich über demselben eine rechteckige Windung, so stellt sich die untere Seite parallel, der Strom geht in derselben ebenfalls nach links, steigt links auf, kreist oben nach rechts u. s. w., kurz er hat für den Beschauer die Richtung der Uhrzeiger, der Beschauer hat auf seiner Seite den Südpol und jenseits des Stromes den Nordpol. Des Beschauers Seite ist aber für einen Schwimmer von rechts nach links, der hier, um die Windung zu sehen, auf dem Rücken liegen muß, die rechte Seite; folglich hat der Schwimmer den Südpol rechts und den Nordpol links, womit Ampères Schwimmerregel abgeleitet ist.

524 **Elektrodynamische Rotationen.** Eine Rotation eines beweglichen Stromes um einen kreisförmigen festen Strom ist schon zum Nachweise des Satzes über begrenzte und unbegrenzte Ströme angeführt worden. Der feste Strom kann aber auch durch einen Magnet ersetzt werden, und man erhält dann die Rotation eines Stromes um einen Magnet. Auf einem vertical befestigten Magnet befindet sich ein Quecksilbernäpfchen, in welchem mittels einer feinen Spitze ein Bügel aus Kupferdraht schwebt, dessen Enden in eine kreisförmige mit Quecksilber gefüllte Rinne herabgehen; diese umgibt den Magnetstab ungefähr in der Mitte, die eine Klemme führt zu der Rinne, die andere zu dem Schälchen, folglich geht der Strom durch die beiden Bügelhälften, entweder zur Rinne hinab oder von der Rinne zum Näpfchen hinauf. Denken wir uns nun z. B. den aufsteigenden Strom neben dem mittleren Querschnitte des Magnetes, in dem wir uns nach Ampères Theorie einen Kreisstrom vorstellen dürfen, so wird der aufsteigende Strom von dem Halbkreise angezogen, in welchem der Kreisstrom von dem Convergenzpunkte wegströmt, und von dem anderen Halbkreise abgestoßen; die beiden den aufsteigenden Strom enthaltenden Bügelhälften müssen also dem Kreisstrome des Magnetes nachlaufen. Würde der Strom in denselben abwärts gehen, so müßte der Bügel sich dem Magnetstrome entgegendrehen. Wie demnach der feste Kreisstrom eines Magnetes einen beweglichen Strom in Rotation versetzt, so kann umgekehrt ein fester Strom einen beweglichen Magnet zum Rotiren bringen. Man benutzt zur Rotation eines Magnetes um einen Strom die Quecksilberrinne des vorigen Apparates, die auch hier mit der einen Klemme verbunden ist, während die andere Klemme mit einem Metallstabe in Verbindung steht, der nur bis

in den Mittelpunkt der Kreisrinne sich erhebt und dort ein Quecksilbernäpfchen trägt. Von einem gerade über demselben befindlichen Häkchen kommt ein Faden herab, an welchem ein zweiarmiges Messingstück befestigt ist, das in seinen Armen 2 verticale Magnetstäbe trägt und durch ein Spitzchen mit dem Quecksilber des Näpfchens und durch einen gebogenen Draht mit dem der Rinne in leitender Verbindung steht. Der Strom geht demnach in dem Metallstabe aufwärts und durch Spitzchen und Draht zum Quecksilber; da er nur bis zur Mitte der Magnete geht, so wirkt er auf die Kreisstromhälften derselben einerseits anziehend und anderseits abstoßend und dadurch drehend. Stellt man in die Mitte statt des Messingstabes einen Magnet, welchen der Strom aber nur zur Hälfte durchläuft, so kann dieser Strom seinen eigenen Träger in Rotation versetzen; hierdurch fallen natürlich die beiden Seitenmagnete weg. — Auch kann der Erdstrom zu einer Strom-Rotation verwendet werden; man benutzt dazu den Apparat zu dem Gesetze für begrenzte und unbegrenzte Ströme, macht aber die verticalen Theile möglichst kurz, läßt den gewundenen Kupferdraht weg und schickt durch den horizontalen mittels der Rinne einen starken Strom, so wird derselbe durch den Erdstrom in Rotation versetzt.

2. Der Elektromagnetismus (Seebeck 1820?). a. Erregung. Die magnetische Wirkung des el. Stromes besteht darin, daß er einen Eisenstab in einen Magnet verwandelt, wenn er in zahlreichen parallelen Drahtwindungen um denselben herumgeleitet wird. Die Lage der Pole bestimmt sich entweder nach Ampères Schwimmerregel: man denkt sich mit dem positiven Strome so schwimmend, daß man den Stab sieht, so hat man den Nordpol zur Linken; oder auch nach der Ampère'schen Theorie: der Nordpol liegt an dem Ende, wo der Strom entgegengesetzt wie die Uhrzeiger kreist. Hieraus folgt, daß beim Umkehren des Stromes die Pole vertauscht werden. In Schmiedeeisenstäben ist der so erregte Magnetismus temporär, man nennt diese temporären Magnete vorzugsweise Elektromagnete; sie haben meist die Form großer Hufeisen und können einen hohen Grad von Magnetismus erreichen. Im Stahl entsteht theils temporärer, theils remanenter Magnetismus. 525

Die Erklärung des Elektromagnetismus erfolgt nach Ampères Theorie einfach damit, daß im Eisen wie auch in anderen Körpern von parallelen Strömen umkreiste Molekularmagnete vorausgesetzt werden, deren Elementarströme nach allen nur möglichen Richtungen gelagert sind, welche aber durch die kräftigen Ströme der Windungen diesen und daher auch einander parallel gerichtet werden, da nicht parallele Ströme nach den elektrodynamischen Grundgesetzen durch ihre Anziehung und Abstoßung sich in parallele und gleiche Richtung zu stellen streben. Daraus folgt, daß in einem Elektromagnet die Elementarströme dieselbe Richtung wie der Windungsstrom haben, daß also der Nordpol da liegt, wo der Windungsstrom den Uhrzeigern entgegengesetzt kreist, womit bekanntlich die Schwimmerregel übereinstimmt. Wegen der Gleichheit der Stromrichtung in den Windungen und in dem Elektromagnet müssen dieser und die Spirale einander anziehen; deßhalb wird ein in eine Spirale hineinragender weicher, freier Eisencylinder ganz in dieselbe hineingezogen.

Wenn man einen Eisen- oder Stahlstab elektromagnetisirt, so dauert der Magnetismus ungeschwächt fort, so lange die Stromstärke sich nicht ändert; unterbricht man den Strom, so verschwindet der Magnetismus in Stahlstäben nur zum geringen Theile, in weichen Eisenstäben größtentheils. Man kann demnach Stahlstäbe zu permanenten Magneten mittels des el. Stromes machen; sehr geeignet ist hierzu das Verfahren von Elias. Kupferdraht wird zu einem hohlen, kurzen, dicken Cylinder zusammengewunden, und dann wird ein Stahlstab, wenn in dem Drahte ein kräftiger Strom einer großplattigen Kette kreist, mehreremale innerhalb desselben hin- und hergeführt und in der mittleren Lage festgehalten, worauf der Strom geöffnet wird. Auch eine Bandspirale kann man hierzu mit Vortheil benutzen (s. 453.). Da man indeß für viele Zwecke große hufeisenförmige Elektromagnete nöthig hat und durch Streichen an denselben Stahlstäbe am leichtesten und stärksten magnetisirt werden können, so wendet man gewöhnlich dieses Verfahren an. — Für elektromagnetische Versuche bedarf man, da der äußere Widerstand nur in dem des Windungsdrahtes besteht, also gewöhnlich nur klein ist, nach Ohms Gesetz einer großplattigen Batterie.

Die erste elektromagn. Erfahrung machte Arago (1820) bald nach Oersteds Entdeckung; er fand, daß ein von einem el. Strome durchflossener Kupferdraht mit Eisenfeile bestreut, diese festhält, indem er sie zu einer Art von Röhre vereinigt, welche beim Oeffnen des Stromes zerfällt; dann fand er, daß eine Stahlnadel magn. wird, wenn man sie in eine Glasröhre bringt, die schraubenförmig von einem Strome umwunden ist.

Page (1838) beobachtete, daß das Magnetisiren eines Eisenstabes mittels

einer galv. Spirale von einem Tone begleitet ist, der nach Marrian (1844) mit dem Longitudinaltone des Stabes, wie er durch Reiben in der Längsrichtung entsteht, übereinstimmt. Wertheim (1848) fand die Tonhöhe unabhängig von der Dicke des Stabes; er unterbrach den Strom öfter mittels eines Blitzrades und fand, daß die Tonhöhe von der Zahl der Unterbrechungen unabhängig sei; Reis in Friedrichsdorf dagegen erhielt, wenn die Unterbrechungen durch die Schwingungen eines Tones selbst geschahen, in dem umwundenen Eisendrahte einen Ton von der Höhe des unterbrochenen Tones, worauf er sein Telephon (1860) gründete. Wertheim erhielt sogar einen Ton in einem Eisenstabe, wenn ein Strom durch denselben geleitet wurde; auch beobachtete er eine im Augenblicke der Magnetisirung auftretende sehr kleine Verlängerung des Stabes, die er für die Ursache des Tones hielt, und die Joule bei einem Versuche = 1/270 000 der Stablänge fand. Das galvanische Tönen wurde von Poggendorff (1857) auch in einem Cylinder von Eisenblech beobachtet, der über eine aufrecht stehende Magnetisirungsspirale geschoben wurde, und zwar sowohl, wenn der Cylinder ganz, als auch wenn er vertical aufgeschnitten war, und im letzten Falle besonders stark, wenn sich die Schnittränder einander berührten.

Ueber die Verlängerung von Eisen- und Stahlstäben beim Magnetisiren durch Spiralströme liegen neue Untersuchungen von Alfred Mayer (1874) vor. Beim ersten Magnetisiren werden beide Arten von Stäben plötzlich verlängert und behalten die Verlängerung bis zur Oeffnung des Stromes, nach welcher die Eisenstäbe eine allmälige Verkürzung, im Stahlstabe aber eine abermalige Verlängerung eintritt. Bei weiteren Stromschlüssen zeigen die Eisenstäbe abermals Verlängerungen, die Stahlstäbe aber Verkürzungen, während beim Oeffnen beiderseits die entgegengesetzten Erscheinungen eintreten. Das umgekehrte Verhalten des Stahles gegen Eisen fand in sehr hartem Stahl auch schon beim ersten Magnetisiren statt. Die Verkürzungen des Eisens bei der Stromöffnung sind immer geringer als die Verlängerungen beim Schließen, so daß eine dauernde Verlängerung übrig bleibt; der Theil derselben jedoch, welcher durch die späteren Versuche entsteht, schwindet nach mehreren Stunden wieder, da er von der beim Entmagnetisiren entstehenden Wärme herrührt. — Balfour-Stewart und Schuster (1874) fanden, daß Kupferdraht, der um einen kräftigen Elektromagnet gewunden ist, zuerst seinen Leitungswiderstand vergrößert, im Allgemeinen aber verkleinert, sowie seine Stelle in der Spannungsreihe ändert.

526 b. Gesetze. Nach Untersuchungen von Lenz und Jacobi (1838) ist das in einem und demselben Stabe erregte elektromagn. Moment unabhängig von der Weite der Windungen, aber direct proportional der Anzahl derselben und der Stromstärke. Man nennt daher das Product aus der Anzahl der Windungen mit der Stromstärke die magnetisirende Kraft der Spirale. Nach eingehenden Versuchen von Müller (1860) gilt dieses Gesetz nur für Stäbe von nicht zu kleinem Durchmesser; für dünnere Stäbe findet sich, daß die Stärke des Magnetismus langsamer zunimmt als die magnetisirende Kraft der Spirale, und daß sich das magn. Moment eines Stabes bei steigender magnetisirender Kraft einem Maximum nähert, nach dessen Erreichung keine Vergrößerung der Stromstärke und der Windungszahl noch einen Einfluß auf den Magnetismus hat. Nach Weber gilt dieses Müller'sche Gesetz allgemein für alle Elektromagnete; das Maximum des Magnetismus, das durch keine Vergrößerung der Stromstärke und der Windungszahl überboten werden kann, ist erreicht, wenn sämmtliche Molekularmagnete gedreht, wenn sämmtliche Elementarströme einander parallel und gleich gerichtet sind. Ueber den Einfluß der Stabdicke hatten Lenz und Jacobi (1844) gefunden, daß das magn. Moment der Stabdicke direct proportional sei. Dub (1861) zeigte dagegen, daß diese Forscher ihren Versuchen nicht die richtige Deutung gegeben hätten, daß vielmehr nach diesen Versuchen der Elektromagnetismus eines Stabes der Quadratwurzel des Durchmessers proportional sei. Müllers Untersuchungen stimmen hiermit nicht ganz überein; nach diesen ist soweit, als man den Magnetismus der Stromstärke proportional setzen kann, derselbe auch der Quadratwurzel aus dem Stabdurchmesser proportional; sonst verhalten sich die magn. Momente verschiedener Stäbe wie die Quadratwurzeln aus den dritten Potenzen der Stabdurchmesser; und das Maximum des Magnetismus ist dem Quadrat des Durchmessers proportional. Ueber den Einfluß der Länge fanden Lenz und Jacobi (1844), sowie Wiedemann (1864), daß das magn. Moment stärker als mit dem Quadrat der Länge, aber weniger stark als mit der Wurzel aus der fünften Potenz zunimmt. Das erregte magn. Moment hängt auch von der Beschaffenheit der Eisensorte ab; in Schmiedeeisen zeigte sich z. B. das temporäre Moment = 0,49, in geglühtem Stahl = 0,4, in hartem Stahl = 0,26, in Gußeisen = 0,22; doch hat der Stahl ein mit der Härte wachsendes permanentes Moment (s. 453.). Theoretisch fand Waltenhofen (1873) das allgemeinere Gesetz: Die magnetisirende Kraft einer beliebig gestalteten Spirale ist proportional dem Product der Stromstärke mit der Summe der Cosinusse aller Winkel, welche die in der Ebene eines axialen Schnittes von einem Punkte jeder Windung zu den

Endpunkten der Achse des magnetischen Stabes gezogenen Graden mit derselben einschließen; $\Sigma M = CS . \Sigma \cos \varphi$. Als ein specieller Fall folgt hieraus das Gesetz von Haedenkamp und Wachsmuth: Die Wirkung einer cylindrischen Spirale ist proportional der Differenz der Summen der Diagonalen und der nicht parallelen Seiten eines Trapezes, dessen parallele Seiten die Achse des Eisenkernes und eine Seite des Spiralcylinders sind.

Die Anziehung zweier Magnetpole gegen einander oder, was dasselbe ist, die Anziehung eines Poles gegen ein Stück genähertes Eisen wächst mit dem Product der beiden Magnetismen, ist daher dem Quadrat der Stromstärke proportional, wie sowohl Versuche von Lenz und Jacobi (1838) als auch von Dub (1851) darthun. Betreffs der Tragkraft läßt sich kein allgemeiner Satz aufstellen; Dubs (1849) Versuche zeigten, daß die Tragkraft eines Poles langsamer wächst als das Quadrat der Stromstärke, aber rascher als die Stromstärke selbst. Dasselbe gilt für Hufeisenmagnete; dabei zeigt sich denn, daß die Tragkraft eines geschlossenen Hufeisens weit größer ist als die Summe der Tragkräfte der einzelnen Pole. Magnus hatte einen Elektromagnet angefertigt, dessen Pole nur 1^{kg} tragen konnten, der aber nach Anlegung des Ankers 70^{kg} zu tragen im Stande war. Diese Erscheinung erklärt man dadurch, daß durch das Anlegen eines Ankers das Hufeisen ein geschlossener Magnet werde, wodurch das magn. Moment an den Enden sich zu der Höhe steigere, die es nach van Rees in der Mitte eines Stabes besitze. Nach Dub ist die Tragkraft auch von der Masse und der Gestalt des Ankers abhängig und wächst im Allgemeinen mit der Masse des Ankers. Auch fand derselbe, daß bei gleicher Stromstärke und gleicher Ankerlänge ein dünnerer Magnet oft mehr trägt als ein dicker, sowie daß eine ebene Polfläche am Ende des Hufeisens selbst günstiger wirkt, als Verjüngungen derselben oder vergrößerte Ansatzstücke, und daß endlich die Tragkraft bei höherer Temperatur etwas kleiner wird. — Wird bei vorgelegtem Anker der Strom unterbrochen, so verliert der Elektromagnet nicht seinen ganzen Magnetismus, wie es der Fall sein würde, wenn der Anker fehlte; dieser zurückbleibende Magnetismus in dem geschlossenen Hufeisen wird magn. Residuum, remanenter Magnetismus genannt; derselbe verliert sich erst beim Abreißen des Ankers, noch rascher aber durch Umkehren des Stromes. Der remanente Magnetismus ist um so geringer, je reiner und weicher das Eisen ist, und je weniger Masse der Eisenkern enthält; für Elektromagnete, die rasch ihren Magnetismus verlieren sollen, wendet man daher hohle Eisenkerne, Blechröhren u. s. w. an. Indessen dringt doch der Elektromagnetismus nicht tief in das Innere des Eisenkernes ein. Nach Feilitzsch (1851) werden von schwächeren Strömen nur die oberflächlichen Schichten magnetisirt, so daß ein massiver und ein hohler Eisenkern dieselbe magn. Kraft erhalten; von einem stärkeren Strome erst werden auch die inneren Schichten magnetisch, aber so, daß auf dem Querschnitte die magn. Kraft rasch vom Rande nach innen abnimmt. Ueber die Vertheilung des Elektromagnetismus auf der Länge des Stabes sind die Forscher noch nicht ganz einig, trotzdem die Folgerungen aus denselben Resultaten von Lenz und Jacobi (1844) gezogen wurden, und diese Differenz bezieht sich sowohl auf den freien Magnetismus der einzelnen Stellen eines Elektromagnetes als auch auf die magn. Polarität der einzelnen Querschnitte. Diese letztere nimmt bekanntlich nach van Rees bei einem gewöhnlichen Magnet von den Polen nach der Mitte hin zu; dasselbe findet auch bei Elektromagneten statt, und zwar nach Dub proportional der Quadratwurzel aus der Entfernung dieses Querschnittes von dem nächsten Ende des Magnetes, während van Rees das Gesetz durch die Formel ausspricht $z = a + b(\mu^x + \mu^{-x})$, worin a, b und μ constante Größen, z das magn. Moment eines Querschnittes und x dessen Abstand von der Mitte des Stabes bedeutet; diese Formel gilt auch für gewöhnliche Magnete, für welche sie van Rees aus einer Formel Biots für den freien Magnetismus ableitete, die derselbe aus Coulombs Versuchen über die Vertheilung des freien Magnetismus auf der Länge eines Stabes gewonnen hatte. Von analoger Gestalt zeigt sich die Formel, welche die Vertheilung des Magnetismus auf der Länge der Anker ausspricht, wie von Weihrich (1864) dargethan wurde; außerdem hat Green (1828) aus seinen theoretisch gefundenen Formeln für die Magnetisirung eines Körpers, die mit Poissons Resultaten übereinstimmen, für den freien Magnetismus eines dünnen langen Stabes eine analoge Formel gefunden, wodurch es wohl feststeht, daß die Rees'sche Formel das Gesetz der Vertheilung ausdrückt, und daß Dubs Satz nur eine Annäherung an die Wahrheit ist. Viel stärker indeß, als das magn. Moment nach der Mitte hin zunimmt, nimmt der freie Magnetismus von den Polen nach der Mitte hin ab, was sich auch in Biots Formel $y = c(\mu^{-x} - \mu^x)$ i— Vergleiche zur Rees'schen Formel ausspricht, wobei man berücksichtigen muß, daß μ [illegible] ächter Bruch ist.

527 c. **Der Diamagnetismus** (Faraday 1845). Die meisten Körper sind entweder paramagn., d. h. sie werden von beiden Polen eines sehr starken Elektromagnetes angezogen, oder diamagn., d. h. sie werden von beiden Polen abgestoßen.

Man bedarf zu solchen Versuchen zweier Eisenkerne von wenigstens 400mm Länge und 25mm Dicke, welche durch eine Eisenplatte, auf der sie stehen, zu einem Hufeisen verbunden und auf ihrer ganzen Länge vielfach mit dickem Kupferdrahte umwunden sind, während auf den nach oben gerichteten ebenen Polflächen eiserne, spitz zulaufende Aufsätze liegen, deren nun die Pole bildende Spitzen einander ganz nahe kommen. Zwischen diese Spitzen werden in Stabform, an einem Cocon- oder Seidenfaden hängend, durch ein Glasgehäuse vor Luftzug geschützt, die zu untersuchenden Körper gebracht. Ein Eisen-, Nickel- oder Kobaltstäbchen stellt sich in die Verbindungslinie der beiden Spitzen oder, wie Faraday sagt, axial, weil es selbst ein Magnet mit entgegengesetzten Polen wird, und weil diese Pole sich dann so nahe wie möglich an die entgegengesetzten Spitzen stellen; ein Wismuthstäbchen stellt sich auf die Verbindungslinie der Spitzen senkrecht oder äquatorial; daraus folgt, daß jedes seiner Enden von der nächsten Polspitze abgestoßen wird.

Diese Abstoßung ist auch direct sichtbar, wenn das Stäbchen nicht in der Mitte zwischen beiden Spitzen hängt; es wird dann beim Schließen des Stromes nicht blos äquatorial gestellt, sondern auch seitlich von dem näheren oder von beiden Polen entfernt; oder wenn man einen kleinen Würfel oder eine kleine Kugel von Wismuth aufhängt; diese werden dann auch von dem näheren Pole entfernt oder seitlich von beiden Polen im Magnetfelde verschoben; oder auch, wenn man Stäbchen oder Kugel nur an einem Pole aufhängt; man sieht dann ebenfalls eine entfernende Verschiebung und äquatoriale Richtung. — Paramagnetisch zeigen sich so: Eisen, Nickel, Kobalt, Platin, Palladium, Titan, Mangan, Chrom, Cerium, Osmium, die meisten Salze dieser Metalle (Ausnahmen Ferrocyankalium, Platinchlorid, Chromtrioxyd, welche diam. sind); dann Flußspath, Turmalin, Porcellan, Tusche, Papier u. s. w. Diamagn. sind: Wismuth, Antimon, Zink, Zinn, Cadmium, Quecksilber, Blei, Silber, Kupfer, Gold, Arsen, Uran, Rhodium, Iridium, Wolfram und die meisten Salze dieser Metalle; dann Phosphor, Schwefel, Tellur, Jod, Flintglas, Fett, Fleisch, Holz, Elfenbein, Eis. Die Flüssigkeiten füllte Faraday in dünne Glasröhrchen, die ebenfalls zwischen die Spitzen aufgehängt wurden und sich dann entweder axial oder äquatorial stellten; Plücker füllte sie in Schälchen von Glimmer oder Glas, die er auf die genäherten Pole stellte; paragm. Flüssigkeiten zeigten dann über jedem Pole einen Berg, diam. nur einen Berg zwischen den Polen; es fanden sich diam. Wasser, Lösungen diamagnetischer und verdünnte Lösungen paramagnetischer Salze, Alkohol, Aether, Schwefelsäure, Salpetersäure, Blut, Milch u. s. w.; param. erschienen concentrirte Lösungen param. Salze. — Merkwürdig ist die Erscheinung, daß eine paragm. Substanz sich diam. verhält, wenn sie in einer stärker diam. Flüssigkeit schwebt, und daß eine diam. Substanz in einer stärker diam. Flüssigkeit paragm. wird; ein Glasröhrchen ist für sich diam., stellt sich aber in Wasser axial, selbst wenn ein Wismuthwürfel an demselben hängt; eine 4procentige Eisenvitriollösung ist in einer 16procentigen diam., in einer 1procentigen paragm., in einer 4proc. indifferent. Plücker (1850) stellte auf einen Pol ein Gefäß, auf dessen Glimmerboden eine an einer Wage balancirte Wismuthkugel ruhte; beim Schließen des Stromes mußten für das Gleichgewicht aus der anderen Schale 785, 745, 885mg genommen werden, je nachdem das Gefäß mit Luft, Wasser oder Eisenchlorid gefüllt war; die Gewichte geben die verschiedene Größe der diamagnetischen Abstoßung in verschiedenen Medien an. Die hier auftretende Analogie mit dem Archimedischen Princip geht so weit, daß man nach Becquerel sagen kann, ein Körper verliert in einem Medium soviel von seiner magn. Eigenschaft, als das verdrängte Medium enthält. — Durch den Einfluß des Mediums sind die Versuche über Gase stark beeinträchtigt. Faraday und Plücker gelang es indeß (1848), den Diamagnetismus der meisten Gase in der Luft, sowie den Paramagnetismus des Sauerstoffs und der Luft nachzuweisen. Plücker ließ einen Strom farbiger Gase zwischen den Polen aufsteigen und fand sie meist in äquatorialer Richtung verbreitert. Faraday mischte etwas Chlorwasserstoffgas unter die aufsteigenden Gase, und brachte in einiger Höhe über den Polen sowohl in der axialen, als in der äquatorialen Richtung Fangröhren an, die mit Ammoniakgas gefüllt waren; erschien der weiße Salmiakdampf in einem äquatorialen Röhrchen, so war das Gas diam.; zeigte er sich in einem axialen, so war es param. Auch Wasserdampf und Quecksilberdampf sowie die Flammen und Kerzenrauch verbreitern sich äquatorial zwischen den Polen, sind also diam. Plücker (1851) füllte die Gase in eine dünne, gläserne Kugel, die leer gepumpt indifferent erschien, und erhielt dann dieselben Resultate; die am schwächsten diam. Gase, wie Stickstoff und Kohlendioxyd zeigten hier keine Wirkung, dagegen wurde Sauerstoff stark angezogen und Wasserstoff stark abgestoßen.

Die diam. Abstoßung rührt nach vielfachen Untersuchungen davon her, daß der be-

treffende Körper in der Nähe eines Poles des Elektromagnetes nicht einen ungleichnamigen, sondern einen gleichnamigen Pol, dagegen am anderen Ende einen ungleichnamigen Pol erhält, daß also die durch einen Magnetpol erregte Polarität des Wismuths umgekehrt ist wie die des Eisens. Reich (1848) näherte einer an einer sehr empfindlichen Drehwage befestigten Wismuthkugel, die von einem Nordpole stark abgestoßen wurde, auch noch einen Südpol und fand dann, daß die Wirkung compensirt war. Tyndall (1856) zeigte, daß, wenn von 2 gleichnamigen Halbpolen ein Wismuthstäbchen äquatorial gestellt wurde, diese Stellung aufhörte, wenn der eine Halbpol ungleichnamig wurde. Plücker und Tyndall zeigten, daß ein Wismuthstäbchen in einer Spirale polarisch wurde, aber entgegengesetzt wie Eisen, und W. Weber construirte (1856) sein Diamagnetometer, mittels dessen er nicht nur die dem Eisen entgegengesetzte Polarität des Wismuths nachwies, sondern auch fand, daß das magn. Moment des Wismuths 1½ Mill. mal kleiner ist als das eines Eisenstabes von gleicher Masse. Sein Apparat bestand aus zwei Spiralen, in welchen 2 Wismuthstäbchen durch einen über 2 Rollen gehenden Faden ohne Ende in eine beliebige Lage gebracht werden konnten, und vor welchen ein kleiner Magnetstab drehbar und mit einem Spiegel versehen aufgestellt war. Wurde durch die Spiralen ein Strom geleitet, so wurde das Wismuth magn. und lenkte den Magnet ab; die Ablenkung wurde mittels Fernrohr und Skale gemessen; sie geschah bei Ersetzung der Wismuth- durch Eisenstäbe in entgegengesetzter Richtung, und aus ihrer Größe konnte das magn. Moment berechnet werden. Aus der Polarität der magn. Substanzen erklärt sich der Einfluß des Mediums. Durch einen Hufeisenpol z. B. wird sowohl ein benachbarter Körper als auch das zwischen beiden liegende Medium polarmagn.; sind beide z. B. param., so wenden beide ihre ungleichnamigen Theile nach dem Hufeisenpole; folglich ist das Medium an dem Körper entgegengesetzt, wird abgestoßen, wo dieser angezogen wird, und übt daher gegen diesen einen Druck aus; je nachdem dieser Druck kleiner, ebenso groß oder größer ist als jene Anziehung, zeigt sich der Körper param., indifferent oder diam. — Die Stärke der diam. Kraft ist abweichend vom Eisen der magnetisirenden Kraft proportional; nur bei sehr starken Strömen fand Plücker ein langsameres Wachsen. — Kugeln aus magn. Substanzen können zwischen den Polen keine bestimmte Lage annehmen; dieser einfachen Folgerung gehorchen aber aus manchen Krystallen gedrehte Kugeln nicht, nehmen vielmehr eine feste Lage an und zwar so, daß ihre Hauptachse oder ihre optische Achse sich axial oder äquatorial stellt; Faraday schreibt diese Erscheinungen einer Eigenthümlichkeit der Metalle zu, die er Magnetkrystallkraft nennt, und Plücker (1858) unterscheidet positive und negative Krystalle, je nachdem der Magnetismus der Achse mit dem des Stoffes übereinstimmt oder nicht; so findet Plücker z. B. pos. param. den Spatheisenstein, neg. param. den Turmalin, pos. diam. den Kalkspath, neg. diam. Eis. — Einen noch interessanteren Zusammenhang des Magnetismus mit der Optik entdeckte Faraday (1847) in der Drehung der Polarisationsebene durchsichtiger Medien durch den Magnetismus. Für Flüssigkeiten kann man das Soleil'sche Saccharimeter benutzen, indem man dessen Röhre mit einer Stromspirale umgibt. Für feste Körper ist Ruhmkorffs Apparat sehr geeignet; derselbe besteht aus 2 in einer Linie liegenden Spiralen mit hohlen Eisenkernen; am einen Ende der einen Spirale befindet sich ein Licht und der polarisirende Nicol, zwischen beiden auf einem Tischchen der durchsichtige Körper und am anderen Ende der anderen Spirale der analysirende Nicol mit einer graduirten Kreisscheibe. Stellt man den letzten Nicol so, daß das Gesichtsfeld dunkel ist, so wird es beim Schließen des Stromes wieder hell, und aus der zur Herstellung der Dunkelheit nöthigen Drehung des Analyseurs ersieht man die Größe der Drehung der Polarisationsebene. Man kann auch Soleils Doppelplatte einschalten und dann die Teinte de passage benutzen. Durch solche Versuche fand man, daß optisch neutrale Körper durch den Elektromagnetismus circularpolarisirend werden, und daß sie die Polarisationsebene in der Richtung der Ampère'schen Ströme drehen. Nach Wiedemann (1851) ist die Größe der Drehung der Stromstärke und der Länge der Flüssigkeitssäule proportional; dreht eine Flüssigkeit schon an sich, so wird die Drehung durch die kreisenden Ströme vermehrt oder vermindert, je nachdem ihre Richtung mit der der Ströme stimmt oder nicht. Nach Wartmann (1846) wird derselbe Einfluß auf polarisirte Wärmestrahlen ausgeübt. Nach Faraday (1845) werden einfach brechende Körper durch Magnetismus doppelt brechend.

8. Die Induction (Faraday 1831). **a. Entstehung und Gesetze.** Unter Induction versteht man die Erzeugung von el. Strömen durch el. Ströme und durch Magnete. Die Erregung durch die el. Ströme nennt man Elektro-Induction, Volta-Induction oder auch Induction kurzweg, die Erregung durch Magnete heißt Magneto-Induction. Es gibt folgende acht verschiedene Arten der Induction: 528

1. Wenn man in der Nähe eines Leiters einen Strom schließt, so entsteht in dem

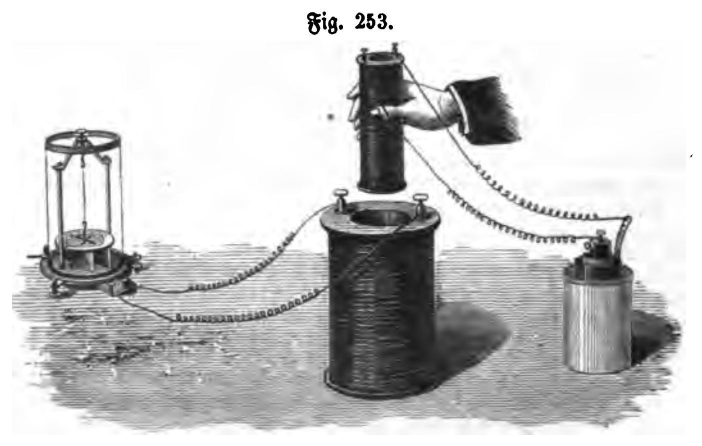
Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung. 2. Wenn man in der Nähe eines Leiters einen Strom öffnet, so entsteht in dem Leiter ein Strom von gleicher Richtung. 3. Wenn man einem Leiter einen Strom nähert, so entsteht in dem Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung. 4. Wenn man von einem Leiter einen Strom entfernt, so entsteht in dem Leiter ein Strom von gleicher Richtung. 5. Wenn man in der Nähe eines Leiters Magnetismus erregt, so entsteht in dem Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. 6. Wenn in der Nähe eines Leiters Magnetismus verschwindet, so entsteht in dem Leiter ein Strom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. 7. Wenn man einem Leiter einen Magnet nähert, so entsteht in dem Leiter ein Strom von entgegengesetzter Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. 8. Wenn man von einem Leiter einen Magnet entfernt, so entsteht in dem Leiter ein Strom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des Magnetes. Die erregenden Ströme nennt man Hauptströme oder inducirende Ströme, die erregten Ströme Nebenströme, inducirte oder Inductionsströme. Als Leiter benutzt man für beide gewöhnlich Spiralen von Kupferdraht, weil dann bedeutende Längen auf einander wirken; für den Hauptstrom muß der Draht dick sein, damit er nicht zu sehr durch Leitungswiderstand geschwächt werde; für den Nebenstrom dagegen nimmt man feinen Draht, weil derselbe einen starken Widerstand vertragen kann, und damit die Windungszahl möglichst groß werde. Die Ströme unter 1. und 2. entstehen nicht blos beim Schließen und Oeffnen eines Stromes, sondern auch bei jeder Verstärkung oder Schwächung desselben; auch entstehen sie nicht blos in einem benachbarten Leiter, sondern auch in dem Stromleiter selbst. In einem Stromkreise entsteht beim Schließen des Hauptstromes ein Strom von entgegengesetzter Richtung, der im Moment des Schließens den Hauptstrom und dadurch die Schlußwirkung schwächt; beim Oeffnen eines Stromes entsteht in dem Stromkreise ein Strom von gleicher Richtung, der die Oeffnungswirkung schwächt, weil diese Wirkung auf dem plötzlichen Aufhören des Hauptstromes beruht, das wegen der allmäligen Ausbreitung des entstandenen Stromes in dem Leiter nicht stattfindet. Diese beiden in dem Stromleiter selbst entstehenden Ströme nennt man Extraströme; sie schwächen die Schluß- und Oeffnungswirkung des Hauptstromes.

Die Inductionsströme unterscheiden sich dadurch von den Hauptströmen: 1. sie sind nur von momentaner Dauer, oder wenn sie durch Bewegung entstehen, von der gewöhnlich ebenfalls sehr kurzen Dauer der Bewegung; deßhalb fällt bei ihnen die Oeffnungswirkung mit der Schlußwirkung zusammen. 2. Ihre Oeffnungs- und Schlußwirkung wird nicht so stark durch Extraströme geschwächt, wie die der Hauptströme, weil das Oeffnen und Schließen des Inductionsstromes meist oder nahe zusammenfällt und weil deßhalb die 2 Extraströme des Inductionsstromes wegen ihrer entgegengesetzten Richtung sich meist oder nahezu aufheben. Die Inductionsströme sind aus diesen Gründen besonders geeignet für solche Schluß- und Oeffnungswirkungen, die in beiden Fällen gleich sind, also für physiologische und für Funkenwirkungen. Die elektromotorische Kraft der Inductionsströme ist unabhängig von der Weite, Dicke und dem Stoffe des Inductionsdrahtes, dagegen proportional der Zahl dieser Windungen, sowie bei der Voltainduction dem Product der Stromstärke und der Windungszahl des Hauptdrahtes, und bei der Magnetoinduction dem magn. Moment des Magnetes (Lenz 1835, Weber 1846). Bei der Schätzung der Stromstärke der Inductionsströme aber muß der Widerstand, den derselbe in und außerhalb der Inductionsspirale zu überwinden hat, berücksichtigt werden, und dann ergibt sich, daß die Stromstärke mit der Leitungsfähigkeit des Inductionsdrahtes zunimmt, daß bei kleinem äußerem Widerstande die Stromstärke nicht mit der Zahl

der Windungen wächst, bei großem äußeren Widerstande jedoch, wie er bei Inductionsversuchen gewöhnlich vorhanden ist, mit der Zahl dieser Windungen zunimmt, weßhalb man für die Inductionsrolle zahlreiche Windungen eines feinen Drahtes nimmt (Folgerung 12 des Ohm'schen Gesetzes). Auch ist die Stromstärke verschieden beim Oeffnungsstrome und Schließungsstrome; beim Schließen wächst nämlich der Hauptstrom langsam wegen des entgegengesetzten Extrastromes; daher hat der Schließungsstrom eine etwas längere Dauer, dieselbe elektromotorische Kraft vertheilt sich auf längere Zeit, wodurch die Stromstärke geringer wird; beim Oeffnen des Hauptstromes dagegen entsteht zwar auch ein Extrastrom; dieser kann aber wegen der Oeffnung des Stromkreises nicht zur Wirkung kommen, so daß das Oeffnen rascher als das Schließen des Stromes vor sich geht; folglich ist dieselbe elektromotorische Kraft beim Oeffnungsstrome in eine kleinere Zeit zusammengedrängt und bildet daher eine größere Stromstärke; daher sind die Zuckungen und die Funkenlängen bei dem Oeffnungsstrome stärker als bei dem Schließungsstrome. Ein ähnlicher Unterschied besteht zwischen der Voltainduction und der Magnetoinduction: die erstere gibt geringere Mengen von bedeutender Spannung, Tensionsströme, die letztere große Mengen von geringer Spannung, Quantitätsströme, was wohl davon herrührt, daß die inducirenden Ströme aus wenigen aber starken Elementarströmen, die inducirenden Magnete aber aus unendlich vielen aber sehr schwachen Elementarströmchen bestehen.

529 b. Nachweise der Induction. Hierzu dienen die Inductionsspulen, Fig. 253. 2 hohle Holzcylinder von verschiedenem Durchmesser, auf welche übersponnener Kupferdraht gewunden ist, auf den weiten zahlreiche Windungen von feinem Drahte, auf den engeren

Fig. 253.



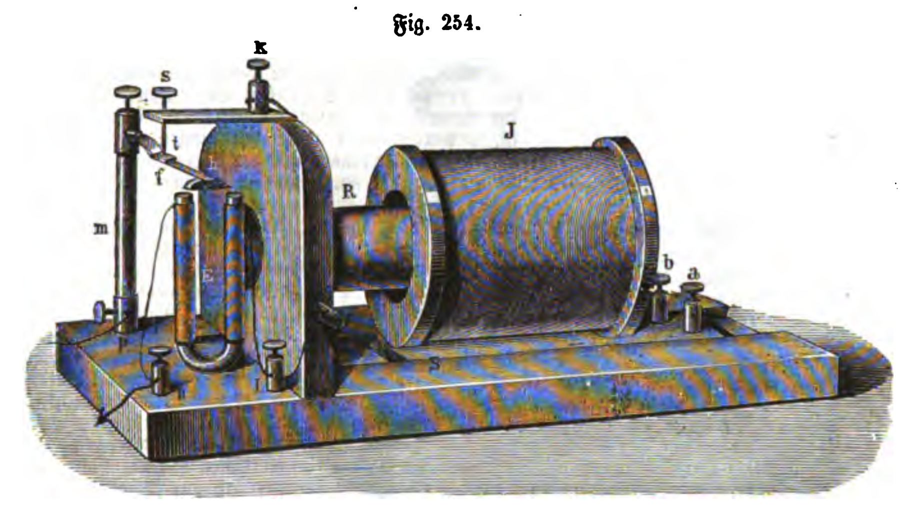
weniger Windungen von dickem Drahte; die weite Spule, die Inductionsspule, steht mit einem empfindlichen Multiplicator, die enge Spule, die Hauptspule, mit einer Batterie in Verbindung, in deren Schließungsdraht ein Stromwechsler eingeschaltet ist. Stecken wir vor dem Schließen des Hauptstromes die enge Spule in die weitere und schließen dann den Strom, so wird in demselben Moment die Multiplicatornadel abgelenkt, kehrt aber nach einigen Schwingungen in die ursprüngliche Lage trotz der Fortdauer des Stromes zurück; hierdurch wird das Entstehen eines Stromes von kurzer Dauer angezeigt, dessen Richtung leicht nach Ampères Schwimmerregel als entgegengesetzt zu der des Hauptstromes erkannt wird. Wird der Strom unterbrochen, so entsteht wieder eine Ablenkung, aber nach der entgegengesetzten Seite, welche ebenfalls nicht dauernd, sondern nur stoßweise stattfindet. Sind die Ablenkungen nur klein, so kann man sie leicht vergrößern, wenn man den Hauptstrom im Tempo der Schwingungen schließt und öffnet, beim Vorangehen schließt und beim Rückgange öffnet. Hiermit sind denn die 2 ersten Inductionssätze nachgewiesen. Die zwei folgenden sind leicht dadurch zu zeigen, daß man bei geschlossenem Haupt-

strome die enge Spule in die weitere steckt; es entsteht dann eine momentane Ablenkung im Augenblicke der Einführung und zwar nach derselben Richtung wie beim Schließen des Hauptstromes. Läßt man die Nadel zur Ruhe kommen und zieht dann die enge Spule aus der weiteren, so entsteht wieder eine momentane Ablenkung, aber nach der entgegengesetzten Seite, also nach derselben Seite wie beim Oeffnen des Stromes. Auch hier kann man die Ablenkungen durch Einstecken und Herausziehen im Tempo der Schwingungen vergrößern. Es entsteht also beim Nähern und Entfernen des Hauptstromes in der Inductionsspule ein momentaner Strom, der im ersten Falle von entgegengesetzter, im zweiten von gleicher Richtung ist wie der Hauptstrom. Steckt man in die engere Spule ein Bündel von schmiedeeisernen Stäben, so werden die 4 genannten Inductionswirkungen bedeutend verstärkt; hierdurch sind die 5te und die 6te Induction nachgewiesen; denn beim Schließen des Stromes entsteht in den Stäben Magnetismus und beim Oeffnen verschwindet solcher; folglich entstehen beim Erregen und Verschwinden von Magnetismus el. Ströme. Da der erregte Magnetismus aus Elementarströmen von derselben Richtung besteht, wie sie die erregenden Ströme besitzen, und da der Inductionsstrom des Schließens eine von den letzteren entgegengesetzte Richtung besitzt, so ist seine Richtung auch den Elementarströmen entgegengesetzt. Der Inductionsstrom des Oeffnens hat eine den erregenden Strömen gleiche Richtung, folglich ist derselbe auch mit den Elementarströmen des Magnetes gleich gerichtet. Noch einfacher ist der Nachweis der 2 letzten Magnetoinductionen. Man entfernt die Hauptspule und führt in die Inductionsspule einen Pol eines Magnetstabes ein; aus der entstehenden Ablenkung der Nadel ist nicht blos das Entstehen eines momentanen Stromes zu erkennen, sondern auch, daß die Richtung desselben der der Elementarströme des eingeführten Poles entgegengesetzt ist. Zieht man den Pol heraus, so zeigt die entgegengesetzte Ablenkung das Entstehen eines momentanen Stromes von entgegengesetzter Richtung, also von einer den Elementarströmen des herausgezogen Poles gleichen Richtung an. Die Entstehung des Extrastromes geht schon daraus hervor, daß eine Batterie, die mit einem kurzen dicken Schließungsdrahte nur einen sehr schwachen Oeffnungsfunken gibt, einen sehr starken Funken erzeugt, wenn sich in dem Schließungskreise eine Inductionsspirale befindet; sind 2 Handhaben an dieser Inductionsspirale so befestigt, daß dieselbe im Moment der Stromunterbrechung durch den menschlichen Körper geschlossen ist, so empfindet man eine starke Zuckung. Doch kann man auch die Extraströme durch ein Galvanometer nachweisen, das man zusammen mit einer Spirale in einen Stromkreis einschaltet; man muß dann nur die Ablenkung der Nadel durch den Hauptstrom verhindern, indem man an der Ablenkungsseite der Nadel einen Stift anbringt; im Moment der Stromöffnung geht dann die Nadel nach der entgegengesetzten Seite. Um den Schließungsextrastrom nachzuweisen, läßt man zuerst die Nadel durch den Hauptstrom ablenken, und erlaubt ihr durch einen Stift die Rückkehr nicht, wenn alsdann der Strom geöffnet wird; schließt man alsdann den Strom abermals mit eingeschalteter Spirale, so wird die Nadel noch weiter abgelenkt, kehrt aber gleich wieder an den Stift zurück; da durch den Hauptstrom die Ablenkung sich nur bis an den Stift erstreckt, so zeigt die weitergehende Ablenkung das Entstehen eines momentanen Stromes von gleicher Richtung beim Schließen des Hauptstromes an.

530 c. Inductionsapparate. 1. Der Schlittenapparat (Dubois-Reymond 1848) (Fig. 254) für medicinische Zwecke, besonders zur Erzeugung einer größeren Anzahl von Zuckungen in einem Körpertheile anwendbar, besteht aus der Hauptspule R, der Inductionsspule J mit einer Entladungsvorrichtung und dem Stromunterbrecher. Die erste, mit kleinerem Durchmesser ist an einem aufrechtem Brette, durch welches sie mit der Batterie verbunden wird, wagrecht befestigt, und enthält ein Bündel von Eisenstäben; die zweite, so weit, daß sie die erste umfassen kann, ist ebenfalls wagrecht auf einem Schlitten befestigt, der auf dem horizontalen Grundbrette S so verschoben werden kann, daß die Inductionsspule die Hauptspule auf jeder beliebigen Länge umschließt; an den Klemmen a und b des Inductionsdrahtes sind zwei Handhaben oder andere für speciell therapeutische Zwecke taugliche Stromenden befestigt. Als Stromunterbrecher dient gewöhnlich der Wagner'sche Hammer (1839), der die Unterbrechung des Hauptstromes durch den Hauptstrom selbst, also selbstthätig besorgt, und demnach so viele Zuckungen erzeugt, als Unterbrechungen stattfinden. Derselbe besteht aus einem kleinen Hufeisen E, das von dem Hauptdrahte umwunden ist, ehe derselbe an die Hauptspule geht; das von der Hauptspule zurückkehrende Ende geht an ein Messingsäulchen m, an welchem ein federnder Hebel fh horizontal befestigt ist, dessen eisernes Ende h als Anker über dem Hufeisen E schwebt. Der federnde Hebel wird an einer Stelle, wo ein Platinblättchen auf denselben gelöthet ist, von der Platinspitze t einer Schraube s berührt, die sich in einer Platte sk dreht, die mit dem zweiten Poldrahte in Verbindung steht, während der erste mit dem Drahte des Hufeisens verbunden wird. Hierdurch ist der Strom geschlossen, das Hufeisen E wird ein Elektromagnet, zieht den Anker h an und löst dadurch den federnden Hebel aus seiner Berührung

mit der Schraubenspitze t, wodurch der Strom geöffnet wird; sowie also der Strom geschlossen wird, öffnet er sich selbst. Hierdurch verliert das Hufeisen seinen Magnetismus, der Anker wird nicht mehr angezogen, und der federnde Hebel kehrt vermöge seiner Feder-

Fig. 254.

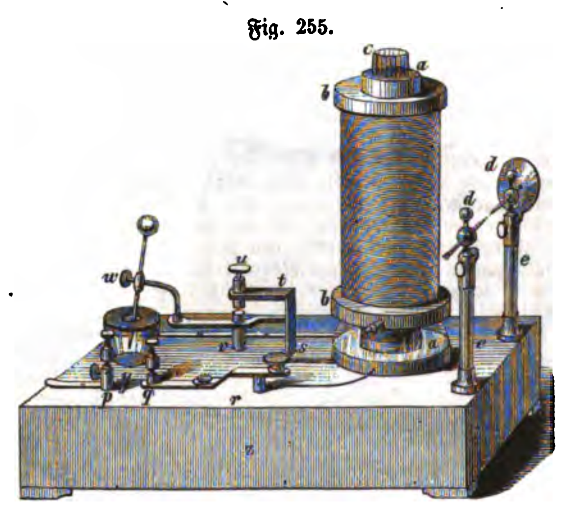


kraft in die ursprüngliche Lage, in die Berührung mit der Schraubenspitze t zurück, wodurch der Strom wieder geschlossen wird; sowie sich also der Strom selbst geöffnet hat, schließt er sich auch wieder. An der Unterbrechungsstelle t ist bei jeder Unterbrechung ein Funke, so daß die Schraubenspitze mit dem Hebel zusammenschmelzen würde, wenn hier nicht Platin verwendet wäre. Die Wirkung wird bedeutend schwächer, wenn das Eisendrahtbündel aus der Hauptspule genommen wird, oder auch wenn statt dessen ein dicker Eisenstab hineingesetzt wird; nach Magnus (1840) entstehen in dem dicken Eisenstabe gleich gerichtete Ströme bei der Unterbrechung, wodurch das Verschwinden des Magnetismus und dadurch die inducirende Wirkung des Stabes geschwächt wird; in dem Drahtbündel können sich aber diese Ströme nicht so ungehindert bilden wie in massivem Eisen, wodurch sich die stärkere Wirkung derselben erklärt. Hierbei wirken hauptsächlich die Oeffnungsschläge, weil die Schließungsschläge viel schwächere Zuckungen und Funken geben. Dies kann man mittels Doves Disjunctor (1844) zeigen. Derselbe besteht aus 2 Metallscheiben, die auf einer Welle sitzend durch ein Elfenbeinstäbchen von einander isolirt sind, und auf ihren Rändern nichtleitende Segmente tragen, welche auf beiden Scheibchen abwechselnd liegen und auf der einen etwas schmäler als auf der anderen sind. An der Seite sitzen an jeder Rolle 2 Klemmen, von denen schleifende Federn an die Rollenumfänge gehen. Die erste Rolle wird in die Inductionsspule, die zweite in die Hauptspule eingeschaltet. Man kann nun die 2 Räder so stellen, daß die Federn der Inductionsspule auf den leitenden Segmenten sind, wenn die der Hauptspule dieselben verlassen oder betreten; im ersten Falle erhält man nur Oeffnungs-, im letzten nur Schließungsschläge; man sieht leicht, daß die von den letzteren erzeugten Funken und Zuckungen viel schwächer sind als die von ersteren; dagegen kann man auch so stellen, daß beide Schläge wie mittels des Wagner'schen Hammers zur Wirkung kommen. Leitet man dieselben gemeinsam durch eine Kupfervitriollösung, so entsteht kein Niederschlag, während jede Art für sich gleich viel Kupfer bildet. Hieraus geht hervor, daß die Oeffnungs- und Schließungsschläge wohl gleiche Quantitäten von El., aber verschiedene Spannungen enthalten. — Mittels solcher Apparate kann man nachweisen, daß die Inductionsströme auch alle Wirkungen der gewöhnlichen constanten Ströme haben.

2. Der Funken-Inductor (Ruhmkorff 1851) (Fig. 255). Auf einen hohlen Cylinder aa von Pappendeckel ist eine Lage 2mm dicken, wohl übersponnenen Kupferdrahtes gewunden, dessen Enden durch Klemmen p und q, Schiebleisten r, Stromunterbrecher svw und Stromwechsler mit der Batterie verbunden, getrennt und umgekehrt verbunden werden können. Auf diese Hauptspule sind die Windungen des $^1/_3$ bis $^1/_5$mm dicken, übersponnenen und gefirnißten Inductionsdrahtes in mehreren Lagen in einer Länge von 1 bis 20 Meilen aufgewickelt, dessen Enden zu 2 auf Glasstäben e sitzenden Knöpfen d gehen. Zur Strom- **531**

unterbrechung wird bei größeren Apparaten Foucaults Interruptor, bei kleineren der ähnliche Interruptor Stöhrers angebracht, der in Fig. 255 deutlich dargestellt ist. In demselben geht von dem eisernen Drahtbündel c, das in der Spule steckt, ein eiserner Winkelhaken stu aus, der an seinem Ende eine eiserne Schraube u trägt; diese wird beim Stromschlusse magnetisch, und zieht einen unter ihr schwebenden Hebel vw an, der an seinem Ende einen in ein Quecksilber enthaltendes Glasgefäß y tauchenden Stift w trägt, in welches der eine Poldraht eingeführt ist. Durch die Anziehung des Hebels wird der Stift aus dem Quecksilber gezogen, gelangt so in eine darüber gelagerte, schlecht leitende Flüssigkeit, wie Weingeist, und hierdurch wird der Strom geöffnet. So erfolgen Oeffnen und Schließen wechselseitig mittels einer schwingenden Bewegung des federnden Hebels. Ein sehr verstärkender Bestandtheil des Apparates ist Fizeaus Condensator (1853). Derselbe besteht aus einem mehrere Meter langen Streifen von Wachstaffet, der auf beiden Seiten mit Stanniol belegt, und um mehrere ganz gleiche, auf einander liegende Tannenbrettchen gewunden ist, und mit diesen in der Schublade des Fußgestelles z liegt; die beiden Enden des Stanniols treten durch Federn und Stifte beim Zuschieben der Lade mit dem Hauptdrahte in Verbindung, und nehmen den Extrastrom auf, wodurch die Wirkung der Unterbrechung verstärkt wird, weil dieselbe nicht durch den Extrastrom in die Länge gezogen wird. Die Knöpfe, welche die Pole des Inductionsdrahtes bilden, sind durchbohrt, um allerlei Entladungsvorrichtungen anzubringen; steckt man 2 Drahtspitzen durch dieselben, wie in Fig. 255, so springen zwischen denselben Funken von 2 bis 50^{cm} Länge und mit einem starken Knalle in regelmäßiger Folge über; der Funkeninductor gibt also einen constanten Funkenstrom, der beim Einschalten einer el. Flasche aus kürzeren, aber kräftigen, blendend hellen und klatschenden Funken besteht, welche dicke Glasplatten durchbohren. Bei geringem Polabstande entstehen Schluß- und Oeffnungsfunken, bei größerem nur die letzteren. Mit dem Funkeninductor lassen sich die meisten el. Versuche anstellen. Einige besonders characteristische sind: Bestreicht man einen Papierstreifen mit Gummilösung, streut Messingspäne darauf, und hängt den Streifen zwischen die Pole, so entsteht ein gewaltiger Blitz, dessen Länge schon auf 5^{m} gebracht wurde. — Schaltet man dünne Drähte von Kupfer, Eisen, Gold zwischen die Pole, so erhält man auf einem unter denselben festgehaltenen Papier nur noch eine schwarze oder braune Spur; Metalldrähte werden also nicht blos geschmolzen, sondern sogar verdampft. — Die Schläge eines mittleren Inductors können einen Menschen lähmen (Quet), die eines großen einen Stier tödten. — Man kann aus einem Pole Funken wie aus einem Conductor beim Annähern eines Fingers erhalten; doch entstehen nach Poggendorff in dieser Weise nur Oeffnungsfunken, während nach Sinsteden ein Elektroskop, wie es dem Wechsel zwischen Oeffnungs- und Schließungsschlägen entspricht, an einem Pole abwechselnd pos. und neg. el. wird. Hieraus geht hervor, daß die Pole freie El. enthalten, daß dieselbe aber beim Schließen eine geringe, beim Oeffnen eine große Spannung hat. Die Schlagweite eines Poles wird vergrößert, wenn man den anderen leitend mit der Erde verbindet. — Von chemischen Wirkungen ist die starke Ozonbildung beim Gange des Funkenstromes durch eine mit Luft oder Sauerstoff gefüllte Röhre zu erwähnen; am einfachsten ist die chemische Wirkung der Inductionsströme an einem mit Jodkaliumkleister bestrichenen Papier zu erkennen, das am pos. Pol gebläut wird. — Wenn die Polspitzen einander nahe kommen, so unterscheidet man in dem Funken 2 Theile, einen hellen Lichtfaden und eine denselben umgebende Lichthülle, die Aureole; der Lichtfaden ist momentan und das Primäre der Erscheinung, die Aureole hat eine etwas längere Dauer und entsteht dadurch, daß der Funken die Luft rings um sich fortschleudert und so sehr verdünnt, daß die El. durch

Fig. 255.



diesen gut leitenden verdünnten Luftraum continuirlich überfließt, bis die Entladung vollendet wird. Dies wird auch dadurch bekräftigt, daß der Lichtfaden von einem Luftstrome nicht bewegt, die Aureole dagegen fortgeweht wird; erzeugt man den Funken zwischen den Polen eines Elektromagnetes, so bleibt der Faden ebenfalls ungeändert; die Aureole wird aber zu einer strömenden halbkreisförmigen Scheibe zusammengedrückt, welche ihre Stellung und Strömung beim Stromwechsel ändert. Noch entscheidender für die Erklärung der Aureole sind die Lichterscheinungen in den Geißler'schen Röhren, Glasgefäße von den mannigfaltigsten Röhrenformen, in welche an zwei von einander entfernten Stellen Platindrähte eingeschmolzen, und welche entweder nahezu luftleer oder mit verdünnten Dämpfen oder Gasen von wenigen Millimeter Spannung erfüllt sind, und eigentlich als eine weitere Ausbildung des el. Eies erscheinen. Schaltet man eine solche lufthaltige Röhre zwischen die Pole des Inductors ein, so erfüllt sich die ganze Röhre mit einer höchst brillanten, lebhaft beweglichen, wellenartigen Lichterscheinung. Am neg. Pole entsteht eine schön lavendelblaue Lichthülle, welche die Elektrode bis auf eine gewisse Entfernung umgibt; die pos. Elektrode ist von glänzenden Funken bedeckt, von denen rothe Schichten ausgehen, die in wellenartigen Pulsationen fast die ganze Röhre erfüllen; zwischen diesem rothen Lichte des pos. und dem blauen des neg. Poles bleibt ein kurzer dunkler Raum übrig; auch die einzelnen Lichtschichten sind durch weniger helle Streifen getrennt, die auf der Längsrichtung der Röhre senkrecht stehen. Dieses Licht der Geißler'schen Röhren ist die Aureole des Funkens, während der Lichtfaden des Funkens fehlt; denn die Spectraluntersuchung zeigt, daß der Lichtfaden aus glühenden Theilchen der Elektroden, die Aureole aber aus glühenden Gasen und Dämpfen besteht, und das Spectrum der Geißler'schen Röhren zeigt nur die Linien der letzteren, nicht aber die der ersteren; zum Zwecke der Spectraluntersuchung benutzt man die Geißler'schen Capillarröhren, weil diese durch Concentration verstärktes Licht geben. Die Schichtung rührt nach Delarive von abwechselnden Verdünnungen und Verdichtungen der Luft her, welche durch den Strom der El. selbst entstehen und dieselbe verschieden gut leiten. In verschiedenen Gasarten ist die Farbe des Lichtes verschieden, wird aber auch häufig durch Fluorescenz des Glases verändert, da das el. Licht zahlreiche fluorescirende Strahlen enthält; darauf beruhen prächtige Licht- und Farbenerscheinungen, die durch Einschalten verschieden fluorescirender Gläser hervorgebracht werden; aus demselben Grunde zeigen auch manche Röhren, wahrscheinlich durch einen Schwefelgehalt erzeugte Phosphorescenz. Daß das Licht der Geißler'schen Röhren ein el. Strom durch gut leitende verdünnte Luft ist, zeigt insbesondere die Ablenkung, die der Lichtstrom durch einen Magnet erfährt, sowie die Rotation desselben um einen in der Röhre angebrachten Elektromagnet.

532 **Die magnetelektrischen Maschinen** (Pixii 1830, Gramme 1871, v. Hefner-Alteneck 1872). Die magnetelektrischen oder Magnetoinductionsmaschinen erzeugen elektrische Ströme durch Magneto-Induction; die neuesten Constructionen derselben haben das Ziel, vollständig ununterbrochene Ströme von unveränderlicher Richtung wie die Batterien zu erzeugen, fast erreicht, stehen aber hinsichtlich der Stärke und Leichtigkeit der Erzeugung dieser Ströme weit über den Batterien, da sie Ströme von fast unbegrenzter Stärke durch blose Umdrehung der Maschinen liefern. Die Inductionsmaschinen älterer Constructionen litten an dem Mangel, unterbrochen, von wechselnder Richtung und nur von geringer Stärke zu sein. Wir wollen daher bei diesen älteren Maschinen nur kurz verweilen. Die erste wurde bald nach Faradays Entdeckung der Induction von Pixii in Paris erfunden. Sie bestand aus einem Hufeisenstahlmagnet, der um eine Mittelachse gedreht wurde und sich dadurch einem Spulenpaar abwechselnd näherte und von ihm entfernte, wodurch in diesem Ströme inducirt wurden. Mehr Verbreitung gewann Stöhrers Maschine (Fig. 256), die auch jetzt noch zu medicinischen Zuckungen verwendet wird. In dieser hat der Hufeisenstahlmagnet NS eine feste Lage und die Spulen C und D drehen sich vermöge der Kurbel um die Achse AA gegen die Pole N und S hin. In den Spulen stecken zwei Kerne von weichem Eisen, welche durch die schmiedeeiserne Platte BB verbunden sind und dadurch ein Hufeisen ohne Magnetismus bilden. Wenn bei der Drehung der Kurbel sich die Spulen den Polen nähern, so entstehen in denselben Inductionsströme, die jedoch wegen der großen Entfernung der Spulen von den Polen nur schwach sein können. Verstärkt werden sie durch die Wirkung der Eisenkerne. Beim Annähern der Spulen nähern sich natürlich auch die Eisenkerne und werden dadurch Magnete. Entstehender Magnetismus aber erzeugt bekanntlich ebenfalls Inductionsströme und zwar von derselben Richtung wie die Annäherung der Spulen; diese beiden Arten der magnetischen Induction verstärken sich demnach. Ebenso entstehen bei der Entfernung der Spulen von den Polen Inductionsströme, zunächst weil die Spulen sich entfernen, hauptsächlich aber, weil der Kernmagnetismus verschwindet, und da auch diese beiden Inductionsströme von gleicher Richtung sind, so verstärken sie sich ebenfalls. Aber die Inductionsströme des verschwindenden Magnetis-

mus und des Entfernens sind von entgegengesetzter Richtung zu den Inductionsströmen des entstehenden Magnetismus und des Annäherns. Sowie also demnach die Spulen an den Polen vorbeigegangen sind, wechselt die Richtung der Inductionsströme in dem Spuldrahte. Es muß daher eine Einrichtung vorhanden sein, welche die Wirkung hat, die Richtung der nach außen z. B. in die Handhaben P und Q fließenden Ströme zu erhalten, eine Einrichtung, die man Commutator nennt. Derselbe besteht bei der Construction in Fig. 256 aus den Gabeln H und K und dem auf der Achse sitzenden doppelten Nasenringe F. In Fig. 257 ist der Ring im Durchschnitte dargestellt; er besteht aus der auf der Achse sitzenden Messingröhre rr mit zwei halbkreisförmigen Nasen nach entgegengesetzten Richtungen an beiden Stirnflächen; diese Messingröhre umschließt eine Elfenbeinröhre (in Fig. 257 schwarz), und diese wird von einer kürzeren Messingröhre r′ umfaßt, die ebenfalls 2 halbkreisförmige Nasen an ihren Stirnflächen hat, die, wie Fig. 257 erkennen läßt, nach entgegengesetzten Richtungen hinausragen wie die Nasen der inneren längeren Röhre. Auf diesen Nasen schleifen die Zinken der zwei Gabeln H und K (Fig. 256) und zwar der Art, daß immer eine Zinke einer Gabel die betreffende Nase berührt, wenn die andere frei in der Luft schwebt, und zwar deßhalb, weil je 2 neben einander liegende Nasen nach entgegengesetzten Richtungen hinausstehen. Nun ist das eine Spuldrahtende m mit dem inneren Ringe, das andere n mit dem äußeren Ringe verbunden, und diese Ringe sind so auf die Achse gesetzt, daß im Moment des Stromwechsels die eine Gabelzinke z. B. 1 ihre Nase verläßt und die andere 2 jetzt ihre Nase berührt. Hat also z. B. bisher das Drahtende m an den inneren Ring r und an die Gabel H pos. El. geführt, so würde ohne den Commutator vom Moment des Stromwechsels an dasselbe Ende neg. El. an die Gabel H hinführen. Da aber in diesem Augenblicke die Zinke 1 den inneren Ring verläßt, die Zinke 2 aber den äußeren berührt, so ist jetzt die Gabel H mit dem äußeren Ringe r′ in Verbindung, die bisher von dem Drahtende n neg. El. empfing, vom Moment des Stromwechsels an dagegen pos. El. erhält, so daß durch die Gabel H immer pos. El. an die Handhabe P gelangt. Solcher Commutatoreinrichtungen, welche die Stromrichtung erhalten, gibt es noch mancherlei; sie haben alle den Nachtheil der Funkenbildung und dadurch auch der Stromschwächung; denn z. B. bei der eben geschilderten Einrichtung tritt bei jedem Abgange einer Zinke von ihrer Nase eine Stromunterbrechung ein, mit welcher bekanntlich immer ein Funken entsteht. Dieser verzehrt nicht nur einen Theil des Stromes, sondern kann bei starken Strömen die Berührungsstellen schmelzen und an einander schweißen. Ein zweiter Nachtheil dieser wie aller älteren Constructionen ist die Nothwendigkeit der Stahlmagnete, da diese schon an sich, noch mehr aber durch die an einer Maschine unvermeidlichen Erschütterungen an Kraft abnehmen, wodurch ihre inducirende Wirkung geschwächt werden muß. Der dritte und Hauptnachtheil derselben ist aber die stete Unterbrechung des Stromes. In der ganzen Zeit der Drehung nämlich, wo die Spulen C und D weit von den Polen N und S entfernt sind, können die Inductionsströme nur bis zum Verschwinden schwach sein; nur wenn sie ganz in die Nähe dieser Pole heranrotiren, können Ströme von nutzbarer Stärke entstehen; es sind daher die von sämmtlichen älteren Maschinen gelieferten Ströme durchaus nicht von gleichmäßigem Flusse wie die Batterieströme, sondern es sind durch Pausen unterbrochene Stromstöße. Das Verdienst, den ersten und dritten Nachtheil der alten Maschinen beseitigt zu haben, gebührt Gramme und v. Hefner-Alteneck; der zweite Nachtheil wurde durch Einführung des dynamo-elektrischen Princips von W. Siemens beseitigt, der auch schon früher den dritten Nachtheil stark reducirt hatte.

Fig. 256.

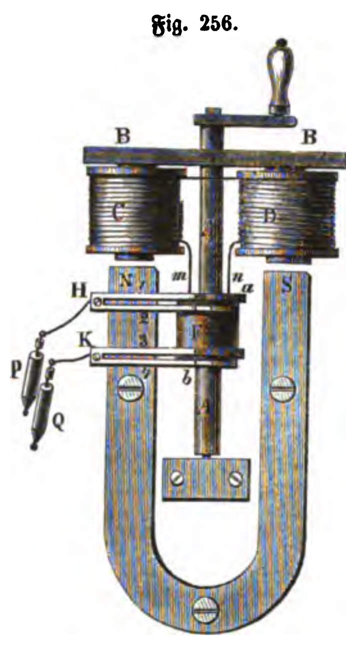


Fig. 257.

Durch Siemens wurde nämlich (1850) schon ein neues Element in die Magnetinductionsmaschinen eingeführt, nämlich der Inductionscylinder (Fig. 258), ein Cylinder von weichem Eisen, der beiderseits tiefe, breite, fast bis an die Achse gehende Nuthen enthält,

wie der Querschnitt A zeigt, die mit zahlreichen der Länge des Cylinders entlang ziehenden Kupferdrahtwindungen ausgefüllt sind. Dieser dünne Cylinder vertritt die Stelle der Inductionsspulen, kann aber eben wegen seiner geringen Dicke zwischen die Pole eines Magnetes gebracht werden, und zwar sind so viele Hufeisenstahlmagnete hinter einander aufgestellt, daß die ganze Länge des Inductionscylinders von Polen umfaßt ist. Wegen der größeren Nähe des Inductionscylinders an den Polen und wegen seiner rascheren Drehbarkeit sind die in dem Drahte desselben inducirten Ströme viel stärker als bei den älteren Maschinen; außerdem bewirken die genannten zwei Umstände viel kürzere Unterbrechungszeiten. Obwohl nun der Inductionsstrom des Siemens'schen Cylinders kein ganz constanter ist, und trotz der Nothwendigkeit eines Commutators und der Stahlmagnete, hat dennoch

Fig. 258.



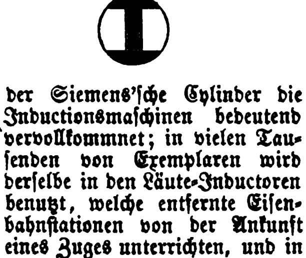
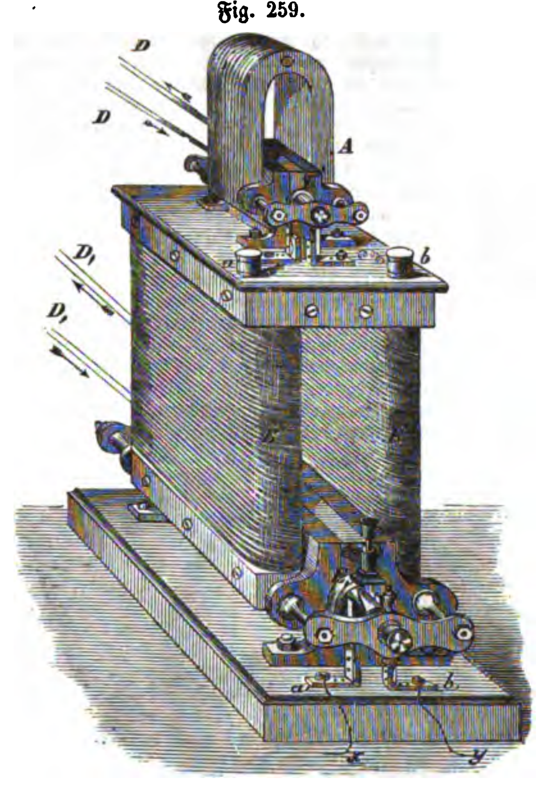


Fig. 259.



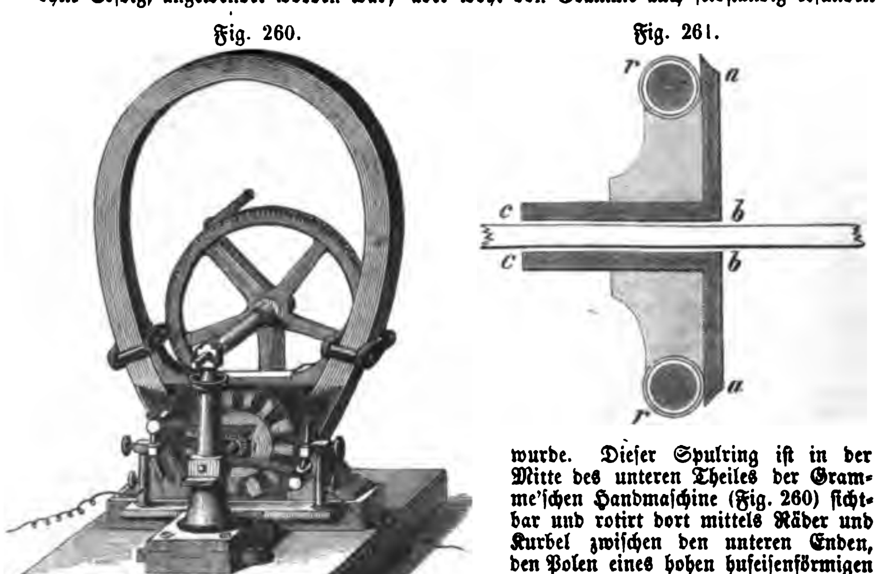
der Siemens'sche Cylinder die Inductionsmaschinen bedeutend vervollkommnet; in vielen Tausenden von Exemplaren wird derselbe in den Läute-Inductoren benutzt, welche entfernte Eisenbahnstationen von der Ankunft eines Zuges unterrichten, und in der magnet-elektrischen Maschine von Wilde (1867) fand er Eingang in die Großindustrie. Diese Maschine (Fig. 259) enthielt zwei oder gar drei Inductionscylinder. Der kleinste E rotirte mittels einer Dampfmaschine zwischen den Polflächen eines längeren Magazins A von Hufeisenstahlmagneten und erzeugte so el. Ströme, die in einem dicken Drahte um 2 große parallele und durch eine dritte Platte verbundene schmiedeeiserne Platten B gingen und diese so zu einem Elektromagnet machten; zwischen den Polschenkelenden desselben rotirte mittels der Schnüre D′ durch die Dampfmaschine ein zweiter Inductionscylinder E′, in dessen Draht dann die nutzbaren, viel stärkeren Inductionsströme entstanden. In einer besonders großen Ausführung seiner Maschine ließ Wilde die Ströme des zweiten Cylinders noch um einen zweiten, größeren Elektromagnet gehen, zwischen dessen Polschenkelenden ein dritter, noch größerer Cylinder rotirte, dessen Inductionsströme dann zu großartigen elektrischen Wirkungen dienten: das durch dieselben erzeugte Kohlenlicht blendete wie die Mittagssonne und ließ Gasflammen matt braun erscheinen; eine die Strahlen desselben vereinigende Sammellinse brannte Löcher in Papier und machte die Wärme noch in 50m Entf. fühlbar; eine mehrere Meter lange Eisendrahtschlinge war schon nach wenigen Minuten geschmolzen, eine kurze Eisenstange, ja selbst ein fingerdicker und meterlanger

Platindraht schmolzen in blendender Weißgluth zusammen. Trotz der Vorzüge des Siemens'schen Cylinders hielten sich diese Wilde'schen Maschinen in der Industrie nicht; die Nothwendigkeit eines Commutators erzeugte starke Funken, und die Stromkraft, die an diesen Funken nicht gänzlich neutralisirt werden konnte, verwandelte sich in den Spuldrähten in Wärme, ja in Gluth, wodurch die Drähte verdarben.

Noch fruchtbarer erwies sich die zweite neue Idee, welche Siemens (1866) in die magnet-elektrischen Maschinen einführte, das dynamo-elektrische Princip, welches die Nothwendigkeit der Stahlmagnete beseitigte und eine fast grenzenlose Steigerung der Stromstärke der Maschinen und dadurch allein deren Anwendung im Großen ermöglichte. Dieses Princip beruht zunächst darauf, daß bekanntlich in jedem einmal magnetisch gewesenen Eisen eine Spur von Magnetismus zurück bleibt, und daß die Erde Spuren von Magnetismus in allem Eisen hervorruft. Sodann aber und hauptsächlich auf der gegenseitigen Multiplication des Magnetismus und der elektrischen Ströme, ähnlich wie in der Holtz'schen Maschine die Kuchen und die Conductoren sich gegenseitig verstärken und multipliciren. Denken wir uns in der Wilde'schen Maschine (Fig. 259) das oben aufgestellte Magazin von Stahlmagneten mit seinem Cylinder ganz weggenommen, denken uns aber den Draht des unteren rotirenden Cylinders mit dem dicken Drahte der beiden Eisenplatten verbunden, so haben wir eine dynamo-elektrische Maschine. Die Spuren von Magnetismus erzeugen in dem Drahte des Cylinders schwache Ströme, welche wegen der Verbindung dieses Drahtes mit dem genannten dicken Drahte um die zwei Eisenplatten fließen, deren Magnetismus verstärken und sie so in einen Elektromagnet umwandeln. Hierdurch werden stärkere Ströme in dem Cylinderdraht inducirt, die wieder den Elektromagnet umfließen und denselben abermals verstärken. In dieser Weise multipliciren sich der Magnetismus der Platten und die Ströme in dem Cylinderdraht gegenseitig bis zu einer gewissen Stärke, die von der Größe der Maschine abhängt. Seine volle Fruchtbarkeit konnte dies Princip erst entfalten, als Maschinen erfunden wurden, welche ununterbrochene Ströme von unveränderlicher Richtung hervorbringen.

Die Gramme'sche magnet-elektrische Maschine (1871) enthält als Hauptelement statt des rotirenden Cylinders einen rotirenden Spulenring, der zuerst von Pacinotti (1860) in einer elektro-magnetischen Kraftmaschine, jedoch in unrichtiger Weise und ohne Erfolg, angewendet worden war, aber wohl von Gramme auch selbständig erfunden

Fig. 260. Fig. 261.

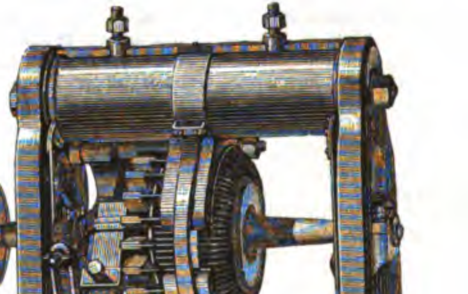


wurde. Dieser Spulring ist in der Mitte des unteren Theiles der Gramme'schen Handmaschine (Fig. 260) sichtbar und rotirt dort mittels Räder und Kurbel zwischen den unteren Enden, den Polen eines hohen hufeisenförmigen Lamellenstahlmagnetes nach Jamin. Er besteht aus einem Eisenringe, auf welchem 30 Drahtspulen eng nebeneinander aufgesetzt sind. In Fig. 260 sind die Spulen durch abwechselnd schwarze und weiße Schraffirung hervorgehoben, wodurch auch angedeutet ist, daß die Drahtwindungen der einzelnen Spulen radial aus- und einwärts um den ringförmigen Eisenkern gezogen sind. Die

weitere Einrichtung des Ringes ist aus der Schnittfigur 261 ersichtlich. Der Eisenkern mit seinen Spulen rr ist durch die sogenannten Strahlstücke abc mit der Drehachse verbunden. Jedes der 30 Strahlstücke abc beginnt an der Hinterseite des Ringes an einer Stelle a, wo der Draht der einen Spule endigt und der Draht einer folgenden beginnt und ist mit diesen 2 Drahtenden zusammengelöthet, so daß alle Spulen einen einzigen zusammenhängenden Draht bilden. Von hier geht jedes Strahlstück radial bis an die Achse, biegt sich dann senkrecht um und geht parallel zur Achse des Ringes durch denselben und noch eine Strecke über die Vorderseite desselben hinaus bis c. Alle Strahlstücke sind durch eine nicht leitende Masse von einander und von der Achse isolirt und in ein compactes Ganzes verbunden. Die zur Achse parallelen Theile bilden einen Hohlcylinder um dieselbe, auf welchem, wie Fig. 260 erkennen läßt, oben und unten zwei wagrechte, aus Metalldrähten lose zusammengesetzte, Besen oder Bürsten schleifen, welche links und rechts mit Messingständern verschraubt sind, an denen sich Klemmschrauben zur Aufnahme der die Ströme fortführenden Leitungsdrähte befinden. Die in den Spulen erregten Ströme werden von den Strahlstücken aufgenommen und durch die Besen an jene Klemmschrauben geführt. Um die Entstehung der Ströme zu erkennen, muß auf die Wirkung eingegangen werden, welche die Pole des Lamellenstahlmagnetes in dem rotirenden Eisenringe hervorbringen. Offenbar erhält die Stelle des Eisenringes, welche an dem Nordpole des Lamellenmagnetes vorbeigeht, durch magn. Influenz einen Südpol und die gegenüberliegende Stelle einen Nordpol. Obwohl nun jeden Augenblick zwei andere Stellen des Ringkerns diesen Nord- und Südpol bilden, so bleiben doch diese beiden Pole immer an derselben Stelle der Maschine, nämlich an den äußersten Stellen links und rechts des Ringes zunächst den Polen des Lamellenmagnetes. Die Wirkung ist demnach dieselbe, als ob der Ringkern still stände und als ob seine Spulenhülle unaufhörlich über ihn fortkreisen würde. Da der Ringkern links und rechts Pole, also oben und unten Indifferenzzonen hat, so ist er eigentlich ein ringförmiger Doppelmagnet; wir müssen daher untersuchen, was in einer schmalen Spule vorgeht, wenn dieselbe über einen Magnet nach dem einen Pole hingeschoben wird und dann weiter geht über einen zweiten Magnet, der mit seinem gleichnamigen Pole an diesen Pol stößt. Dabei benutzen wir Ampères Theorie, nach welcher ein Magnet aus parallelen Kreisströmen besteht, und nach welcher in zwei an einander stoßenden gleichnamigen Polen, wie die Zeiger zweier gegenüberstehender Uhren, diese Elementarströme entgegengesetzt kreisen. Geht die Spule über einen solchen Doppelpol hin, so entfernt sie sich von allen Elementarströmen des einen Magnetes, wodurch in derselben ein Strom von gleicher Richtung inducirt wird; gleichzeitig nähert sie sich aber auch ebenso vielen aber entgegengesetzt gerichteten Elementarströmen des anderen Magnetes, wodurch in ihr ein Strom von entgegengesetzter Richtung dieser entgegengesetzt gerichteten Ströme, also ein Strom von derselben Richtung inducirt wird; ein Doppelpol verstärkt also die Inductionsströme. Geht nun die Spule über den Doppelpol hinaus auf den zweiten Magnet, so bleibt die Stromrichtung ungeändert, die Intensität aber nimmt ab; denn wir entfernen uns dann immer noch von allen Elementarströmen des ersten Magnetes, der gleich gerichtete Entfernungsstrom desselben bleibt, wird aber schwächer, weil der Abstand der Spule von demselben wächst. Wir nähern uns auch noch immer den meisten Elementarströmen des zweiten Magnetes, so daß auch der zweimal entgegengesetzt und darum gleich gerichtetete Näherungsstrom desselben erhalten bleibt; aber wir entfernen uns auch bald von einem Theile dieser Ströme, so daß ein entgegengesetzt gerichteter Inductionsstrom entsteht, der den gleich gerichteten schwächt. Diese Schwächung nimmt zu, je näher wir der Indifferenzzone des zweiten Magnetes kommen; der erste Magnet verliert bald jeden Einfluß, da der Abstand der Spule von demselben zu groß wird; die Zahl der Elementarströme des zweiten Magnetes, denen sich die Spule nähert, wird immer kleiner, und die Zahl der Elementarströme, von denen sie sich entfernt, immer größer, so daß der Inductionsstrom immer schwächer wird, aber seine Richtung behält. Endlich in der Indifferenzzone nähert sich die Spule genau eben so vielen Elementarströmen, als sie sich von solchen entfernt, da der erste Magnet jetzt ganz ohne Einfluß ist. In der Indifferenzzone entsteht daher kein Strom, aber es findet Stromwechsel statt. Denn sowie die Spule über diese Stelle hinaus ist, entfernt sie sich von mehr Elementarströmen des zweiten Magnetes, als sie sich solchen nähert; es entsteht daher in ihr ein Inductionsstrom von derselben Richtung wie die der Elementarströme des zweiten Magnetes, also ein Inductionsstrom von entgegengesetzter Richtung wie bisher, der fortwährend zunimmt, bis er auf dem zweiten Doppelpole seine größte Stärke erreicht. Wenden wir diese Betrachtung auf alle Spulen des Gramme'schen Ringes (Fig. 260) an, so erhalten wir als Resultat: Alle Spulen der rechten Hälfte des Ringes erzeugen unaufhörlich gleich gerichtete Ströme, die, weil sie dem rechten Besen am nächsten sind, alle durch diesen abfließen, und alle Spulen der linken Hälfte erzeugen unaufhörlich Ströme von entgegengesetzter Richtung, die, weil sie dem

linken Besen am nächsten sind, alle durch diesen abfließen. Hierdurch erklärt es sich, warum der Strom des Gramme'schen Ringes ununterbrochen ist. Weiter sind eben wegen der ringförmigen Lagerung der Spulen immer Spulen in allen nur denkbaren Stellungen gegen die Doppelpole und die Indifferenzzonen vorhanden, so daß immer Ströme von allen hier möglichen verschiedenen Intensitäten entstehen, wodurch die Constanz der Ströme erklärt ist. Die beiden Besen und Ständer der Gramme'schen Maschine verhalten sich wie die beiden Pole einer Batterie, durch welche ebenfalls entgegengesetzte Ströme constant abfließen. Die kleine Handmaschine (Fig. 260), welche für manche Schulversuche und medicinische Zwecke ausreicht, ist natürlich für industrielle Zwecke nicht brauchbar; Maschinen für solche Zwecke haben übrigens dieselbe Einrichtung des Ringes; nur wird derselbe durch eine Dampfmaschine oder einen anderen Motor mittels eines Riemens und der Rolle links an Fig. 262 in so rasche Rotation versetzt, daß er Tausende von Umdrehungen in einer Minute macht. Wegen dieser großen Triebkräfte kann bei solchen Maschinen das dynamo-elektrische Princip zur Anwendung kommen. Der Elektromagnet ist hier durch die dicken, eisernen Walzen oben und unten in Fig. 262 ersetzt, die in dieser für Galvanoplastik bestimmten Maschine nicht von dicken Kupferdrähten, sondern nur von Kupferblechen umgeben sind; durch diese gehen die Ringströme, wandeln dadurch die Eisenbarren in Magnete um, und gehen dann weiter zu der Nutzstelle. In den Gramme'schen Lichtmaschinen, die der Fig. 262 ganz ähnlich sind, gehen dagegen die Ringströme in zahlreicheren Kupferdrahtwindungen um die 2 Eisenbarren, so daß dieselben eher den gewöhnlichen Elektromagneten gleichen. Die Leistungen dieser dynamo-elektrischen Maschinen sind großartig, während die der magnet-elektrischen Handmaschine (Fig. 260) nicht völlig genügen, z. B. einen Platindraht von $^1/_3$mm Dicke und 2dm Länge nur zur Rothgluth bringen und in 1 Minute etwa 20ccm Knallgas entwickeln, außerdem aber wegen der Anwendung von Stahlmagneten die Gefahr allmäliger Schwächung darbieten. In letzter Zeit werden von Metzger in Alt-Breisach dynamo-elektrische Handmaschinen gebaut (Fig. 263), welche demnach von jener Schattenseite frei sind. Dieselben zeichnen sich außerdem durch größere Billigkeit, dauerhaftere Construction (stählerne Achsen und Lager) und erhöhte Leistungsfähigkeit aus; 1 Eisendraht von 1mm Dicke und 15cm Länge wird von einer solchen Maschine geschmolzen und in 1 Minute werden 60ccm Knallgas entwickelt. Diese Ueberlegenheit liegt theilweise in der eigenthümlichen Construction des Ringkernes, der aus Eisendraht gewunden ist, theilweise darin, daß auf diesem Kerne die Spulen in 60 Abtheilungen vorhanden sind. Die Ringströme gehen um den leicht aus der Figur ersichtlichen Elektromagnet und dann durch den Versuchsapparat; die beiden Pole der Maschine sind also der linke Besenständer und die Klemme, mit welcher der dicke Draht des linken Magnetschenkels verbunden ist.

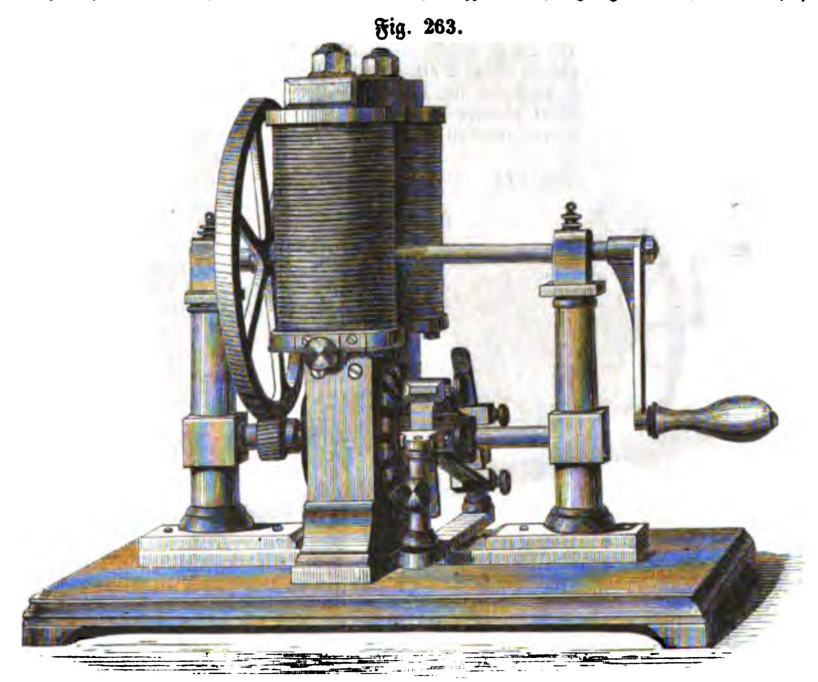
Fig. 262.



So bedeutend auch die Leistungen der Gramme'schen Maschine sind, so ist dieselbe dennoch nicht frei von Mängeln, die eine Ausführung über eine gewisse Grenze der Größe und Leistungen hinaus nicht gestatten. Zunächst muß der Magnetismus von einer Stelle des Ringkernes zur anderen wandern und seine Polarität wechseln, wodurch molekulare Bewegung d. i. Wärme entsteht, welche noch durch die von der Bewegung des Ringes in sich selbst inducirten Ströme vermehrt wird; der Kern wird also erhitzt. Außerdem ent-

steht auch in den Spuldrähten durch den Leitungswiderstand Wärme, ein Nachtheil, der übrigens allen magnetel. Maschinen gemein ist; in der Gramme'schen Maschine müssen außerdem die Ströme durch unerregte Stellen an der Innenseite des Ringes gehen, und die schwachen Ströme, die in den der Indifferenzzone nahe gelegenen Spulen entstehen,

Fig. 263.

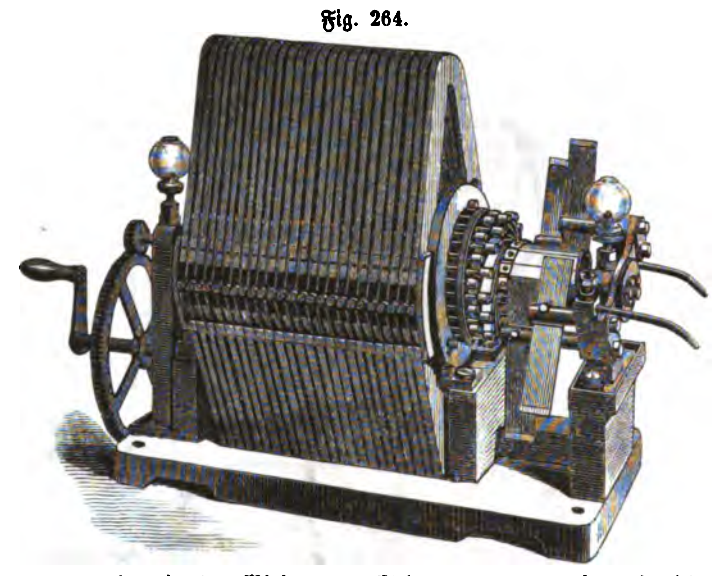


müssen ebenfalls bis zu den Besen fließen, wodurch eine specielle Wärmequelle dieser Maschine entsteht; auch sind die Besen nicht funkenfrei. Durch alle diese Wärmequellen können die Drähte bis zur Gluth erhitzt werden. Endlich muß der Magnetismus der Pole durch die Drahtschicht der Spulen hindurch auf den Ringkern wirken. Die beiden ersten Nachtheile sind wesentlich in der folgenden Maschine vermindert.

Die von Hefner-Alteneck'sche magnet-elektrische Maschine liefert wie die von Gramme einen constanten Strom von unveränderlicher Richtung; sie wird auch wie die Gramme'schen Maschinen sowohl als Handmaschine mit permanenten Magneten, wie auch für Motorenbetrieb mit Anwendung des elektrodynamischen Princips gebaut. Fig. 264 stellt die Handmaschine vor, welche an Stärke die von Gramme weit übertrifft. Dieselbe enthält oben und unten 24 parallel hinter einander aufgestellte, spitzwinkelige Stahlmagnete, welche die Trommel, das Hauptelement der Alteneck'schen Maschine fast ganz umschließen. In dieser Trommel befindet sich ein Eisenkern und auf den Mantel der Trommel sind die Inductionsdrähte gezogen, jedoch nicht der Quere nach um die Trommel gewickelt, sondern der Länge nach aufgewunden. Hierdurch ist der Nachtheil beseitigt, daß die Spuldrähte nur in einem kleinen Theile ihrer Länge Induction erfahren; vielmehr ist fast die ganze Drahtlänge, mit Ausnahme der über die beiden Stirnflächen der Trommel hinlaufenden Theile, der Wirkung des Magnetismus ausgesetzt, wodurch sich die überwiegend kräftige Wirkung dieser Maschine erklärt und eine Wärmequelle wegfällt. Innerhalb der Trommel befindet sich der Eisenkern, ein aus starken schmiedeeisernen Tafeln zusammengesetzter Hohlcylinder, der concentrisch von der Trommel umgeben ist und zwar so nahe, daß die Trommel fast den Mantel dieses Kernes bildet. Bei der Handmaschine (Fig. 264) ist rechts ein kleiner Theil der Trommel mit den Ableitevorrichtungen sichtbar, der von ihr eingeschlossene Kern natürlich nicht; in dieser Maschine sitzen Kern und Trommel auf einer Drehachse, bei den Alteneck'schen dynamo-elektrischen Großmaschinen dagegen, von denen Fig. 265 und 266 einen schematischen Quer- und Längsdurchschnitt darstellen, ist der Kern k unbeweglich und ganz frei von der Trommel t, welche sich allein mit ihrer Bewickelung um den Kern dreht;

dadurch sind die erst erwähnten Schattenseiten der Gramme'schen Maschine und die Erhitzung des Kerns vermieden. Kern und Trommel sind bei den Alteneck'schen Maschinen von bedeutender Länge und sind, wie der Längenschnitt (Fig. 266) erkennen läßt, auf ihrer

Fig. 264.



ganzen Länge der inducirenden Wirkung von Elektromagneten ausgesetzt. An jeder Stelle der ganzen Trommellänge befindet sich links ein Hufeisen ns und rechts eines ns (Fig. 265) und zwar sind dieselben so aufgestellt, daß sie ihre Schenkelenden gegen einander wenden; diese Schenkelenden sind oben und unten durch bogenförmige Eisenstücke nn und ss mit einander verbunden. Alle Schenkel der Hufeisen sind von einem einzigen Drahte umwunden, der mit dem Trommeldrahte in Verbindung steht. Wenn daher durch Spuren von Magnetismus des Eisenkerns in dem Trommeldrahte el. Ströme inducirt werden, so fließen dieselben auch um die Hufeisenschenkel und wandeln dieselbe in Elektromagnete

Fig. 265.

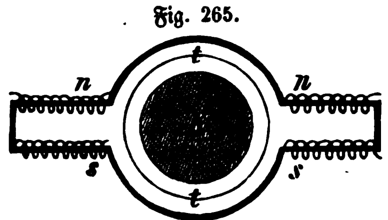
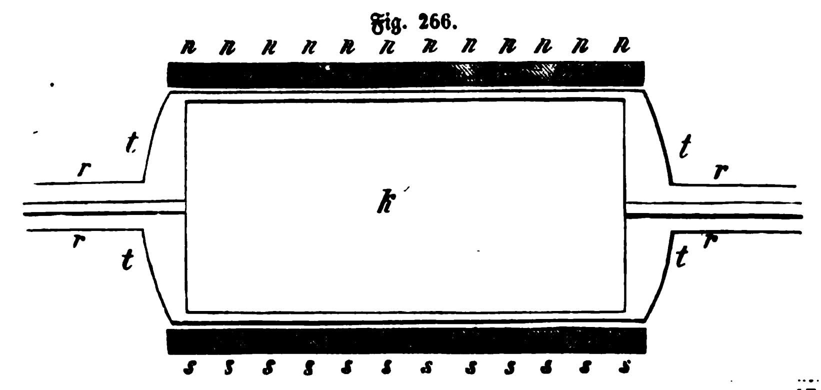


Fig. 266.



um; diese verstärken durch Influenz den Magnetismus des Eisenkerns, wodurch wieder die Inductionsströme im Trommeldrahte intensiver werden, so daß nach dem dynamo-elektrischen

Princip die Elektromagnete und der Eisenkern immer stärker magnetisch und die Inductionsströme in den Drähten immer intensiver werden. Die Bewickelung der Elektromagnete ist so eingerichtet, daß die oberen Schenkelenden der Hufeisen Nordpole n und die unteren Südpole s enthalten; da nun die Eisenbogen immer gleichnamige Pole verbinden, so sind die oberen Bogen nach Jamin überall besonders stark nordmagnetisch und die unteren ebenso stark südmagnetisch, und durch Influenz wird in den benachbarten weiten Oberflächentheilen des Kerns ebenfalls starker Magnetismus erregt. Diese nahe Umschließung der Trommel nnd ihres Drahtes durch große Magnetpolflächen auf ihrer ganzen Länge ist die zweite Hauptursache der colossalen Wirkung dieser Maschine. Wie die Trommeldrähte in 16 Abtheilungen aufgewunden sind und wie diese ihre Ströme an einen Stromsammler und an 2 Besen leiten, ist einigermaßen aus Fig. 264 ersichtlich, kann aber hier nicht ausführlich betrachtet werden; nur ist zu erwähnen, daß die Alteneck'sche Maschine nicht blos stärker, sondern auch freier von Funken und Erhitzung ist, als die Maschine von Gramme. Weitere Vervollkommnungen werden wohl nicht ausbleiben und allmälig das Ziel erreichen, Ströme von unbegrenzter Stärke ohne Schädigung der Maschine durch blose Drehung derselben zu erregen.

Eine andere nützliche Verwendung der Magnetinduction ist der Minenzünder (1867); Breguets Minenzünder besteht aus einem Magazin von einigen Hufeisenstahlmagneten, an dessen Pole weiche Eisenkerne mit Inductionsspulen angeschraubt sind, deren Drähte mit der Patrone verbunden werden. An den weichen Eisenkernen liegt ein Anker an; in dem Moment, wo derselbe losgerissen wird, entstehen kräftige Inductionsfunken. Dieselben erscheinen sicherer und sind viel einfacher zu erreichen, als mit Ruhmkorffs Inductor, sie wirken bestimmt zu gleicher Zeit an verschiedenen Minen, sind also der Entzündung durch elektrisches Drahtglühen vorzuziehen.

533 Weniger wichtige Inductionserscheinungen sind: 1. Die Inductionsströme höherer Ordnung, d. h. solche Ströme, welche durch Inductionsströme in benachbarten Spiralen erregt werden, und sowohl physiologisch als durch ein Galvanometer nachgewiesen werden können. — 2. Die Induction durch den Erdmagnetismus, welche Faraday (1832) an der Ablenkung einer Galvanometernadel wahrnahm, als eine Spirale aus der Richtung der Inclination rasch um 180° gedreht wurde; bringt man in die Spirale noch einen weichen Eisenkern, so kann man starke Ströme erhalten; Weber (1854) benutzte diese Ströme zur genauen Bestimmung der Inclination eines Ortes; in einer horizontalen, rasch um 180° gedrehten Spirale wird ein Strom durch die verticale Componente $R \sin i$ des Erdmagnetismus erregt, und in einer verticalen rasch um 180° gedrehten Spirale durch die horizontale Componente $R \cos i$; da die Stromintensitäten s diesen Kräften proportional sind, so ist $\tan g\, i = s : s'$, woraus man i finden kann. — 3. Die unipolare Induction ist eine Induction in Leitern, in Bezug auf welche die Magnetkraft sich nicht ändert, während bei der gewöhnlichen Magnetinduction der Magnetismus sich entweder durch Nähern oder Verändern in Bezug auf den Leiter vergrößert oder verkleinert, oder dasselbe durch Entstehen oder Verschwinden, Verstärken oder Schwächen thut. Solche unipolare Induction kann man wahrnehmen an Plückers (1856) und an Webers Inductionsapparat. Der erste besteht aus 2 Magnetstäben, die parallel zu einander und zu einer Achse in einer Kupferscheibe stecken und mit dieser rasch gedreht werden; auf der Scheibe sowohl als auch auf 2 auf der Achse sitzenden kleinen Metallrollen schleifen Federn, die zu Klemmen gehen; verbindet man die 2 letzten Federn mit einem Galvanometer, so zeigt sich kein Strom; dagegen ist ein solcher wahrzunehmen, wenn die erste und eine der zwei letzteren mit demselben verbunden werden. Diese Erscheinung ist eine Umkehrung der Rotation von Magneten um einen Strom (524.). Doch gibt es auch eine Umkehrung der Rotation eines Magnetes um seine Achse (524.), nämlich eine Induction durch Rotation eines Magnetes um seine Achse. Ein Magnetstab steht einerseits mit einer Stahlgabel, anderseits mit einem Räderwerke in Verbindung, das ihn in rasche Rotation versetzt, und trägt in seiner Mitte eine Kupferscheibe, die Quecksilber in einem untergesetzten Gefäße berührt; sind die Gabel und das Quecksilber mit einem Galvanometer verbunden, so zeigt sich bei der Rotation ein Strom. Rotirt eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines Hufeisenmagnetes, so entstehen vom Centrum nach der Peripherie gerichtete Ströme. Eine Umkehrung dieser Erscheinung ist die Rotation von Barlows Rad, das mit seinen Zahnspitzen in Quecksilber zwischen den Polen eines Magnetes taucht und hierdurch radiale Ströme enthält, die von dem Magnet angezogen werden. — 4. Der Rotationsmagnetismus oder die Induction in körperlichen Leitern (Arago 1825). Bringt man unter eine schwingende Magnetnadel eine Metallplatte, so nehmen die Schwingungsbögen rascher ab als ohne die Platte; man macht hiervon Anwendung zur Dämpfung der Schwingungen von Galvanometernadeln. Bringt man eine Kupferscheibe auf einer Schwungmaschine in rasche Rotation, so wird eine Magnetnadel, die nahe über derselben schwebt

(durch eine Glastafel von ihr getrennt), abgelenkt, ja sogar zur Rotation gebracht. Ebenso wirkt ein Elektromagnet dämpfend auf die Rotation einer zwischen seinen Polen schwebenden Metallkugel, und ebenso geräth eine Kupferscheibe zwischen den Polen eines rasch rotirenden starken Magnetes in Rotation. Alle diese Erscheinungen rühren daher, daß die Magnete Ströme induciren, wenn sie sich in der Nähe von Leitern oder diese in ihrer Nähe bewegen. Diese Ströme haben eine den Inductionsgesetzen gemäße Richtung, welche sich am einfachsten aus dem Gesetze von Lenz (1834) ableiten läßt, dem alle Inductionsströme folgen: der Inductionsstrom hat eine solche Richtung, daß seine und des erregenden Stromes elektrodynamische Wirkung dem Leiter die entgegengesetzte Bewegung von derjenigen ertheilen würden, welche den Strom erregt hat. Da dieses Gesetz für alle 8 Inductionen gilt, wie man leicht bestätigen kann, so gilt es auch hier; ein bewegter Magnet und eine bewegte Scheibe erhalten demnach durch die von ihnen inducirten Ströme einen Antrieb, der ihrer Richtung entgegengesetzt ist, der daher die Schwingungen einer Nadel dämpft, und umgekehrt eine ruhende Nadel ablenkt; in dem letzten Falle hat die Nadel das Bestreben, der Scheibe eine ihrer eigenen Richtung entgegengesetzte zu geben; es herrscht demnach zwischen den an die Nadel heran rotirenden Theilen und der Nadel Abstoßung, und zwischen den von der Nadel weg rotirenden Scheibentheilen und der Nadel Anziehung, so daß die Nadel sich in der Richtung der Scheibe drehen muß. — Ist der Magnetstab unbeweglich, so wird ein an demselben schnell vorbeibewegter Magnet warm; so erhöht eine zwischen den Polen eines Magnetes rotirende Metallscheibe ihre Temperatur bedeutend, und bedarf zu dieser Temperaturerhöhung einer vermehrten äquivalenten Arbeit (Joule 1843, Foucault 1855). — 5. Eigenschaften der Extraströme. Ueber die Extraströme der Hauptströme gibt Blaserna (1873) an, daß jeder Schließungs-Extrastrom aus 50 bis 100 entgegengesetzt verlaufenden, rasch auf einander folgenden, immer schwächer werdenden Strömen von 0,0003 bis 0,0004 Sec. Dauer bestehe, indem der Hauptstrom beim Schließen nicht sogleich seine normale Intensität erhalte, sondern etwa 0,02 Sec. lang 50 bis 100 mal über und unter die normale Intensität schwanke; das erste Max. gehe fast bis zur doppelten Stärke, das erste Min. fast bis Null; die folgenden Schwingungen würden immer kleiner und länger andauernd. Auch der Oeffnungs-Extrastrom sei so gebildet, nur seien seine Oscillationen intensiver, rascher und weniger zahlreich. Die Erklärung liegt wohl darin, daß der erste Stoß des Schließungs-Extrastromes den Hauptstrom schwächt, daß diese Abnahme einen Strom von gleicher Richtung inducirt, der den Hauptstrom verstärkt, daß diese Zunahme einen Strom von umgekehrter Richtung inducirt u. s. w.; auch könnte man zur Erklärung an Extraströme der Extraströme denken. Denn auch die Inductionsströme treten mit Extraströmen auf. Man kann sich z. B. vorstellen, die Oeffnung eines Stromes bestehe darin, daß derselbe mit gleichmäßiger Abnahme, also erst nach einer gewissen Zeit, verschwinde; da nun die Abnahme einen Strom inducirt und da diese Abnahme während der Oeffnungszeit constant bleibt, so muß auch der entstehende Inductionsstrom während dieser Zeit constant sein; demnach verhält sich dieser Strom wie eine kurz geschlossene constante Säule. Wie nun eine solche Säule bei ihrem Schließen und Oeffnen Extraströme inducirt, so muß auch der kurz dauernde Inductionsstrom bei seinem Entstehen und Aufhören Extraströme erregen. Diese Extraströme des Inductionsstromes ändern in dem angeführten Falle zwar den Verlauf des letzteren, aber nicht seine Elektricitätsmenge, da sich mathematisch beweisen läßt, daß die beiden Extraströme gleich und entgegengesetzt sind. Wären in solchen Fällen die Inductionsströme ohne Dauer oder von unmeßbar kleiner Dauer, so würden ihre Extraströme sich ganz oder nahezu aufheben und gar keinen Einfluß auf den Inductionsstrom ausüben, worin, wie schon erwähnt, eine der Ursachen der kräftigen Oeffnungs- und Schließungswirkungen der gewöhnlichen Inductionsströme liegt. Es gibt indeß auch Fälle, wo dieses Aufheben nicht eintritt, wo also die Extraströme schwächend wirken, wie z. B. in magnetelektrischen Maschinen. Kohlrausch folgert dies aus der Wirkung seines Sinusinductors, der aus einem kreisförmigen, in einer Inductionsrolle sich 100 mal per Sec. umdrehenden Magnet besteht, und dazu dienen sollte, die Wirkung alternirender Ströme auf die Polarisation zu untersuchen. Bei dieser Untersuchung stellte sich, obwohl hier nur die Ueberschüsse der 2 alternirend entstehenden Gase wirksam sein können, eine besondere Stärke der Polarisationsströme heraus; die Zersetzung von $^1/_{70}$ mg Wasser auf 2 Platinplatten von je 1qm lieferte eine elektromotorische Kraft wie die Daniell'sche Kette. Als nun ein solcher Polarisationsapparat eingeschaltet war, wurde der von dem Sinusinductor erzeugte Strom stärker; dies ist nur dadurch erklärlich, daß durch die Polarisation der Extrastrom aufgehoben wird. Kohlrausch beweist mathematisch, daß der Polarisationsstrom und der Extrastrom einander gleich, aber entgegengesetzt sind. Hiermit ist das Vorhandensein des Extrastromes dargethan und zugleich ein Mittel geboten, durch Einschaltung eines Polarisationsapparates, eines Gefäßes mit Säure und 2 Platinplatten, die Wirkung von Inductionsmaschinen zu verstärken. — 6. **Absolute**

Maße der Stromstärke und der Constanten. Die Magnetinduction wird nach Weber (1852) dazu benutzt, die elektrischen Messungen in den Grundmaßen der Mechanik: mg, mm und Sec. vorzunehmen. Die magnetische Kraft ist nach Gauß schon in absolutem Maße (455.) ausgedrückt; man führt daher die Einheit der elektromotorischen Kraft und der Stromstärke auf die Einheit der magnetischen Kraft zurück. Die Einheit der elektromotorischen Kraft ist diejenige elektromotorische Kraft, welche durch die Einheit der magnetischen Kraft in einem Stromkreise von 1qmm Flächeninhalt inducirt wird, wenn dieser Kreis in 1 Sec. aus einer dem Magnet parallelen Lage in eine zu demselben senkrechte Lage gedreht wird. Die Einheit der Stromstärke hat derjenige Strom, welcher eine Fläche von 1qmm umkreisend, einem in der Achse des Kreises befindlichen Magnet, dessen magn. Moment = 1 ist, ein Drehungsmoment = 1 ertheilt. Die Einheit des Widerstandes hat derjenige Stromkreis, in welchem die Einheit der elektromotorischen Kraft die Einheit der Stromstärke erzeugt. Da diese Weber'sche Widerstandseinheit, welche man durch das Symbol $\frac{\text{mm}}{\text{Sec.}}$ bezeichnete, sehr klein ist, so hat die British Association (1861) vorgeschlagen, 10 000 000 000 Weber'sche Einheiten als Widerstandseinheit einzuführen, und hat für diese Einheit, Ohmad genannt, Etalons aus Platin-Silberdraht-Spulen bestehend anfertigen lassen; demnach ist

$$1 \text{ Ohmad} = 10^{10} \frac{\text{mm}}{\text{Sec.}} = 1 \frac{\text{Erdquadrant}}{\text{Sec.}}$$

Nach neueren Untersuchungen genügen jedoch die Etalons der B. A. dieser Bedingung nicht. Kohlrausch fand vielmehr (1874), daß

$$1 \text{ B. A. Einheit} = 1{,}0196 \frac{\text{Erdquadrant}}{\text{Sec.}},$$

daß sie also nicht 10 000 Mill., sondern 10 196 Mill. Weber'schen Einheiten gleich ist. Auch die Siemens'sche Quecksilbereinheit hat Kohlrausch mit der Ohmad verglichen und fand

$$1 \text{ Siemens'sche Quecksilbereinheit} = 0{,}9717 \frac{\text{Erdquadrant}}{\text{Sec.}}.$$

Auch die Jacobi'sche Kupfereinheit und die Langsdorff'sche Silbereinheit (504.) sind in absolutem Maße ausgedrückt worden; jedoch zeigen die Resultate verschiedener Forscher noch wenig Uebereinstimmung. Um einen Ueberblick des Zusammenhangs der verschiedenen Widerstandseinheiten zu bieten, möge nach einer Tabelle Wüllners ihr Werth in Silbereinheiten folgen: Die Jacobi'sche Einheit = 27, die Siemens'sche Einheit = 47, die Ohmad = 10^{10} Weber'sche Einheiten = 45, die B. A. Einheit = 49 Silbereinheiten. Die Decimalbrüche sind hierbei weggelassen; auch diese Angaben entsprechen nicht den obigen.

534 **Anwendungen des Elektromagnetismus und der Induction.** 1. Die elektromagnetischen Kraftmaschinen oder Motoren (Jacobi 1835). Die Anziehung und Abstoßung eines Elektromagnetes kann zum Betriebe einer Kraftmaschine benutzt werden und hat zahlreiche Constructionen solcher Motoren hervorgerufen; die Grundidee der meisten besteht darin, daß in dem Augenblicke, wo ein Magnet durch Anziehung an einen Pol eines anderen Magnetes gelangt ist, ein Polwechsel und dadurch Abstoßung stattfindet, wodurch der erste Magnet, der während der Unterbrechung durch seine Trägheit an dem Pole vorbeiging, nun abgestoßen wird und so seine Bewegung fortsetzt. Die Hoffnungen, die man anfänglich auf diese Maschinen setzte, haben sich nicht erfüllt, weil bei jeder solchen Bewegung Inductionsströme entstehen, deren Richtung nach dem Lenz'schen Gesetze eine solche ist, daß sie den sich bewegenden Körpern die entgegengesetzte Bewegung ertheilen und daher die Hauptbewegung und somit den Effect bedeutend schwächen. Außerdem ist auch das Element, durch dessen Verbrennung die Maschinenkraft entsteht, das Zink, viel theurer als die Kohle, und zur Verbrennung wird nicht Sauerstoff der Luft, sondern der Schwefelsäure und Salpetersäure zugeführt, wodurch auch dieser Sauerstoff theurer wird.

Am einfachsten ist das Princip aus Ritchies (1836) Construction ersichtlich. Dieselbe besteht aus einem U-förmigen Stahlmagnet, über dessen Polen ein ganz kurzer Elektromagnet um eine vert. Achse drehbar schwebt. Auf der Achse sitzt der Commutator, bestehend aus einem Holzringe mit 2 nicht ganz halbkreisförmigen Messingstreifen als Mantel, auf welchen 2 von den Polklemmen herkommende Federn schleifen, und an welche die Enden des Drahtes des Elektromagnetes befestigt sind. In dem Moment, wo die Pole der Magnete sich gegenüberstehen, schleifen die Federn auf den Zwischenräumen der Halbringe, und

gehen dann auf einen anderen Halbring über, wodurch der Polwechsel und demnach Abstoßung an Stelle der bisher stattgefundenen Anziehung eintritt und so die Achse weiter gedreht wird. — Jacobi hatte 4 feste und 4 drehbare Magnete, die eine horizontale Achse und mit ihr ein Schaufelrad eines Bootes drehten, mit welchem Jacobi (1839) Fahrten auf der Newa machte. — Wagner, dem der deutsche Bundestag (1842) einen hohen Preis ausgesetzt hatte, wollte die explosive Kraft des Knallgases benutzen; doch wird ihm auch die Construction mit 2 Elektromagneten zugeschrieben, welche durch eine Excentriksteuerung abwechselnd den Strom erhielten und dadurch abwechselnd 2 Anker anzogen; diese befanden sich an einem Hebel, der seinen Stützpunkt zwischen den 2 Magneten hatte und sich daher wie ein Balancier abwechselnd hin- und herneigte, und so mittels seiner Verlängerung eine Kurbel umdrehte. Diese Constructionen haben alle den Nachtheil, daß sie ein plötzliches Aufhören des Elektromagnetismus verlangen, was bekanntlich nicht möglich ist. Stöhrer (1846) vermied dies dadurch, daß er den Elektrom. durch eine el. Spirale anziehen und abstoßen ließ, und durch den Commutator nicht den Magnetismus wechselte, sondern die Richtung des Stromes in dieser Spirale, wodurch ebenfalls der vorher angezogene Elektrom. nachher abgestoßen wurde und so sich und seine Achse in Rotation versetzte. — Page (1850) benutzte die Anziehung, welche eine Drahtspirale auf einen weichen Eisenkern ausübt, zu einer ähnlichen Construction; zwischen 2 aufrechten Drahtrollen ist ein Balancier um den Mittelpunkt drehbar, und trägt an seinen Enden zwei oben in die Drahtrollen hineinragende Eisenkerne; durch einen auf der Welle sitzenden Commutator wird der Strom während jeder Umdrehung abwechselnd durch die beiden Rollen geleitet, wodurch die Eisenkerne abwechselnd angezogen werden und so den Balancier in eine wiegende Bewegung versetzen, die durch eine Verlängerung desselben und eine Schubstange eine Schwungradwelle dreht. Legt man die zwei Spulen in eine Linie und den Eisenkern in ihre Mitte, so wird derselbe abwechselnd hin- und hergezogen, und kann dann ebenfalls mittels einer Pläuelstange eine Kurbel drehen (Fessel 1851). — Grüel (1863) verwendet als Triebkraft die Anziehung, mit welcher ein Magnet einen ihn blos in einer Kante berührenden Anker um diese Kante zu drehen strebt, bis die Flächen einander berühren; hierauf wird der Strom geöffnet; die Anziehung erfolgt bei dieser Maschine aus der möglich geringsten Entfernung. — Von den zahlreichen, theilweise auch in die Industrie übergegangenen Constructionen ist die von Kravogl (1867) dadurch hervorragend, daß sie den plötzlichen Pol- oder Stromwechsel umgeht. Die Poldrähte gehen an kupferne Würfel, welche, 18 an der Zahl, um die Achse eines Rades herum einen Ring bilden und den Anfang von 18 Speichen darstellen, in denen je 2 von einander isolirte Drähte von jedem Würfel an die Peripherie hin gehen; dort sitzen zwischen je 2 Speichen eine, also im Ganzen 18 Drahtspulen von einem weichen Eisenringe umschlossen, und in einer ringförmigen Röhre einen halbkreisförmigen, leicht auf Frictionsrollen laufenden Eisenkern einschließend. Die Spulen sind durch die Speichendrähte und die Würfel mit einander verbunden; doch findet am 1., 7. und 13. Würfel eine Unterbrechung dieser Verbindung statt, weil diese Würfel zwischen ihren Drähten in 2 von einander isolirte Hälften gespalten sind; folglich geht der Strom immer nur durch $^1/_3$ der Spulen, die demnach von dem Eisenkerne angezogen werden und so das Rad zum Rotiren bringen. Durch die Drehung des Rades gelangen die Poldrähte von selbst auf andere Würfel, und bringen so den Strom auf das folgende Drittel der Spulen. Diese Maschine erregte viel Interesse in der Pariser Ausstellung 1867. — Jacobi gab für die el. Motoren folgende Theorie: Ist die el. Kraft eines Elementes $= e$, die Anzahl derselben $= n$ und der Widerstand $= w$, so ist die Stromstärke $i = ne : w$; geht dieser Strom in z Windungen um einen Eisenkern, so ist dessen Magnetismus $m = zi = zne : w$, und die Anziehung oder Abstoßung zweier Pole $p = z^2n^2e^2 : w^2$. Werden nun durch die Bewegungen Ströme von entgegengesetzter Richtung inducirt und sinkt dadurch die Stromstärke auf i', so ist der Magnetismus $m' = zi'$ und die Schwächung der Induction $= i - i'$. Nun ist aber (nach 528) die Stärke der inducirten Ströme $= c \,.\, zm'v : w$, worin c eine Constante und v die Geschw. des erregenden Mag. bedeutet; daher entsteht die Gl. $c \,.\, zm'v : w = i - i'$, woraus $v = (i - i')\, w : czm'$ oder, wenn man für i und m' die obigen Werthe setzt $v = [(ne : w) - i']\, w : cz^2i'$. Die Kraft, mit welcher sich nach der Induction die Magnetpole anziehen, ist $p = z^2 i'^2$; und diese Kraft muß nach Axiom 3. dem Widerstande, den die Kraftmaschine überwindet, gleich sein. Demnach ist der Effect der Maschine $= p'v = i'w\,[(ne : w) - i'] : c$, worin c von der Construction der Maschine abhängt; der Effect wird ein Maximum, wenn $i = ne : 2w = {}^1/_2 i$, wenn also die durch die Bewegung geschwächte Stromstärke gleich der Hälfte der ursprünglichen Stromstärke ist. Dieses Maximum wird durch keine Construction erreicht, hauptsächlich wegen des remanenten Magnetismus; die besten Stöhrer'schen Maschinen geben nur 2,2% der vom Zink entwickelten Stromkraft, die von Kravogl nach Waltenhofen 25%; demnach stehen die Motoren in der Ausnutzung der Kraft ihres Motorenstoffes den Dampfmaschinen fast gleich. Nun

gibt aber 1kg Kohle 7200c, 1kg Zink nur 1200c bei der Verbrennung, also gibt Zink 6mal weniger Kraft als Kohle; da nun Zink 10mal theurer als Kohle ist, so sind die elektrischen Motoren bis jetzt noch 60mal theurer in der Kraftleistung als die Dampfmaschinen. Jede magnetelektrische Maschine wird durch Umkehren des Verfahrens, was sie durch Umkehren des Namens wird: eine elektromagnetische Kraftmaschine. Verbindet man die Drähte einer magnetel. M. mit den Klemmschrauben einer zweiten, so wird die zweite durch die Ströme der ersten umgetrieben. Man kann daher zwei solcher Maschinen zum Transport von Arbeit benutzen, z. B. der Arbeit der Gebirgsbäche, Wasserfälle, der Meeresfluth u. s. w. in die Städte; durch jene Arbeiten läßt man in einer magnetel. M. Ströme erzeugen, leitet dieselben durch Kabel in die Städte und verwandelt sie dort durch eine elektromagn. M. wieder in Arbeit, oder auch in Wärme, Licht u. s. w.

535 **Die elektrische Telegraphie.** Da der el. Strom sich durch metallische Leiter mit großer Geschwindigkeit und mit geringem Verluste an Stromstärke fortpflanzt, so kann man an sehr entfernten Orten Stromwirkungen hervorbringen und dieselben als telegraphische Zeichen benutzen, vorausgesetzt, daß von einem Orte zu dem entfernten Orte eine isolirte und geschlossene Stromleitung vorhanden ist. Zu dieser Stromleitung bedurfte man ursprünglich eines von dem pos. Pole des einen Ortes ausgehenden Drahtes, der an einen zeichengebenden Apparat des anderen Ortes und dann an den neg. Pol des ersten Ortes zurückging; man bedurfte also zweier Drähte, bis Steinheil (1838) entdeckte, daß an Stelle des zurückleitenden Drahtes die Erde benutzt werden kann, indem an dem ersten Orte der neg. Poldraht, an dem zweiten der pos. in die Erde geleitet wird. Außer dem am zweiten Orte, der Empfangstation, befindlichen Zeichen gebenden Apparate, dem Receptor, ist auf dem ersten Orte, der Aufgabestation, ein Apparat nöthig, mittels dessen durch Stromschluß, Stromöffnung oder Stromunterbrechung die Zeichen gegeben werden, der Manipulator. Nach der Wirkungsart des Receptors unterscheidet man Nadeltelegraphen, bei welchen die Zeichen in Zuckungen einer vom Stromdrahte umwundenen Magnetnadel bestehen; Zeigertelegraphen, an welchen ein Zeiger sich auf einem Buchstabenkreise wie auf einem Zifferblatte dreht und an dem telegraphirten Buchstaben einen Augenblick still hält; Schreibtelegraphen, in welchen ein Metall- oder Schreibstift Punkt- und Linieneindrücke auf einen Papierstreifen macht, und für welche aus Punkten und Strichen ein eigenes Alphabet gebildet ist; Drucktelegraphen, mittels welcher die übersandte Nachricht direct in gewöhnlichen Buchstaben auf Papier abgedruckt wird; Pantelegraphen, welche eine vollständig getreue Nachbildung einer jeden beliebigen dem Manipulator dargebotenen Zeichnung oder Schrift anfertigen, und welche als eine specielle Gattung der chemischen Telegraphen erscheinen, in denen der Receptor durch eine elektro-chemische Zersetzung bleibende Zeichen bildet. Die Nadel- und Zeigertelegraphen haben den Nachtheil, nur vorübergehende Zeichen zu geben, die Druck- und Pantelegraphen sind zwar höchst sinnreich, aber äußerst complicirt, der Schreibtelegraph zeichnet sich durch Einfachheit und durch leichte Verständlichkeit der Zeichen aus.

Die Steinheil'sche Entdeckung, die Erde als Rückleitung zu verwenden, wird in der Weise ausgeführt, daß man auf der Aufgabestation den neg. Poldraht tief in die Erde leitet und dort mit einer großen Metallplatte endigen läßt, während der pos. Poldraht zu der Empfangsstation in den Receptor geht und von dort ebenfalls in die Erde geleitet wird und mit einer Platte endigt. Steinheil stellte sich anfangs vor, der el. Strom kehre wirklich von der Endplatte der Empfangsstation zu derjenigen der ersten Station zurück, die zwischen beiden Platten liegende Erdsäule sei also ein Leiter des Stromes wie der Draht, und erhalte ihre Leitungsfähigkeit durch ihren größeren Querschnitt. Diese theoretisch wohl zulässige Vorstellung hat aber unannehmbare Consequenzen und widerspricht Versuchen Wheatstones; man hat sie daher durch die Vorstellung ersetzt, die Erde wirke nur als unendlich großes Reservoir, in welchem sich jede El. von menschlichen Apparaten spurlos verliere. Diese Vorstellung hat aber den Mangel, daß in ihr der el. Strom in dem Telegraphendrahte nur aus einer Art von El. besteht, während doch früher der el. Strom als eine Vereinigung der beiden einander entgegenströmenden El. dargestellt wurde. Bedenkt man aber, daß die zweite, gegenströmende El. nur die Aufgabe hat, die erste zu neutrali-

siren und so erneutes Fortströmen derselben möglich zu machen, so muß man zugeben, daß die Aufgabe auch gelöst ist, wenn die erste El. in das unendliche Reservoir einströmt und dadurch verschwindet.

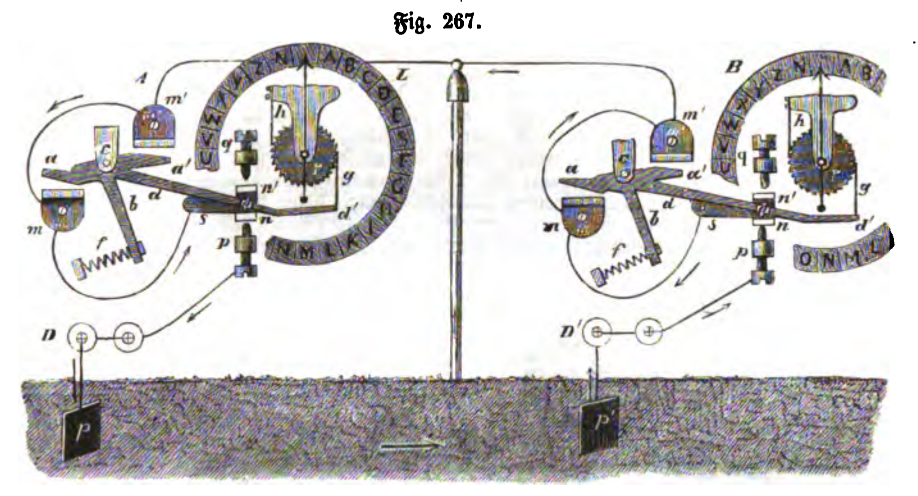
Sömmering in München (1808) construirte den ersten el. Telegraphen, indem er die el. Wasserzersetzung in 35 Gläschen mit 35 Drähten benutzte. Nach Oersteds Entdeckung (1820) schlug sogleich Ampère an Stelle dieser Gläschen Magnetnadeln vor. Schilling von Canstatt (1832) wandte zuerst nur 2 Drähte und eine Nadel an, deren Zuckungen die Zeichen gaben, welche durch einen Stromwechsler auf der ersten Station erregt wurden. Gauß und Weber (1833) führten den ersten Nadeltelegraphen im Großen zwischen dem physikalischen Cabinet und der Sternwarte in Göttingen aus, benutzten aber als Manipulator einen Magnetinductor, dessen Rolle sie von dem Magnet weghoben und wieder aufsetzten. Steinheil (1837) erbaute den ersten Drucktelegraphen zwischen München und Bogenhausen; an zwei sich drehenden Magneten waren kleine mit flüssigem Pigment gefüllte Gefäßchen befestigt, welche nach der Drehung einen Papierstreifen berührten und so Zeichen auf denselben machten; hierbei wurde auch zuerst die Erde als Rückleiter benutzt. Hiernach ist die Telegraphie eine durch und durch deutsche Erfindung; doch waren die Apparate unpractisch und wurden nicht für große Strecken und nicht für das gewöhnliche Leben verwendet. Dies geschah zuerst mit dem Nadeltelegraphen von Wheatstone und Cooke (1837) an der Great-Western-Eisenbahn in England, wobei indeß noch 5 Nadeln und 5 Drähte zur Verwendung kamen, die jedoch bald dem einfachen und Doppelnadel-Telegraph weichen mußten. Wheatstone ist der Erfinder der Zeigertelegraphen (1840), des elektromagn. Weckers und des Relais, das dazu dient, einen Receptor durch eine Localbatterie der Empfangsstation in Bewegung zu setzen, da hierzu der schwache von der Aufgabestation herkommende Strom meist nicht ausreicht. Schon in dem Zeigertelegraphen wie in dem Relais wurde der Elektromagnetismus benutzt, indem durch den Strom der Aufgabestation ein Hufeisen der Empfangsstation magn. gemacht wurde; die wichtigste Anwendung gab Morse dieser Idee, der sie schon 1832 gefaßt und 1837 in einem Modell ausgeführt hatte, aber erst 1844 auf einer größeren Strecke zur Anwendung brachte, indem er durch die Bewegungen eines von einem Hufeisen angezogenen Ankers einen Schreibstift in Bewegung setzte. Die Zeigertelegraphen wurden in Frankreich von Breguet (1845), in Deutschland von Siemens und Halske (1848), sowie von Kramer auf den höchsten Grad der Vollkommenheit gebracht. Der Drucktelegraph, für welchen Wheatstone (1841) und Morse (1847) die ersten Constructionen erfunden hatten, erreicht in dem Apparat von Hughes in New-York (1861) die größte Vollendung. Der erste elektrochemische Telegraph war von Bain (1843), dann folgte Bakewell (1847) mit seinem Copirtelegraphen und Gintl (1853) mit einer dem Morse'schen Schreibtelegraphen ähnlichen Einrichtung; das Ideal aber erreichte Caselli nach 10jähriger Arbeit (1856—65) in seinem Pantelegraphen. Das wichtigste Ereigniß in der Telegraphie bildet dann der transatlantische Telegraph, in welchem die Gauß'sche Spiegelablesung zu erweiterter Anwendung kam.

1. Der Nadeltelegraph. Auf der ersten Station steht als Manipulator ein Stromwechsler, auf der zweiten als Receptor eine vertical aufgehängte astatische Doppelnadel, deren innere Nadel in einem Multiplicator schwebt, während die äußere Nadel vor demselben und dem ganzen Gehäuse als Zeiger sichtbar ist; der Multiplicator ist in die Drahtleitung eingeschaltet und trägt seitlich einen Stift, so daß die Nadel sich nicht ganz senkrecht zu den Windungen stellen, sondern nur kurze Zuckungen machen kann. Wird auf der Aufgabestation der Strom geschlossen, so zuckt die Nadel nach der einen Seite; wird der Strom umgekehrt, nach der anderen Seite; aus diesen Zuckungen nach rechts und links ist das Alphabet zusammengesetzt. Weil eine Nadel für alle Buchstaben des Alphabets sehr viele Zuckungen erforderlich macht, so haben Wheatstone und Cooke den Doppelnadeltelegraph construirt, der aus 2 Nadeln und 2 Handgriffen besteht, die gleichzeitig mit beiden Händen regiert werden und so mehr verschiedene Combinationen aus weniger Zuckungen zulassen. So einfach diese Einrichtung auch ist, so gibt sie doch zu vielen Irrthümern Veranlassung, weil die Zeichen vorübergehend sind und eine so gespannte Aufmerksamkeit verlangen, daß die meisten Menschen dieselbe bald nicht mehr leisten können und die Zeichen falsch auffassen. Damit der Zeichengeber sich immer selbst controliren kann, ist mit dem Stromwechsler immer auch ein Receptor verbunden, so daß die Zeichen auf beiden Stationen gegeben werden. Um den Telegraphisten aufmerksam zu machen, steht auf dem Apparat ein Signalwerk. Wheatstone gab demselben folgende Construction: der Leitungsdraht geht um ein Hufeisen und macht dasselbe magnetisch; dasselbe zieht dann einen Anker an, welcher in seiner vorherigen Stellung das Ablaufen eines Weckers hemmte und nach der Anziehung demselben seinen freien Lauf gestattet. In England patentirt, sind die Nadeltelegraphen dort sehr verbreitet.

2. Der Zeigertelegraph von Siemens und Halske unterscheidet sich von dem

Breguets, Wheatstones und Anderer dadurch, daß in diesen die Umdrehung durch ein mittels des Elektromagnetes ausgelöstes oder regulirtes Uhrwerk geschieht, in jenem aber durch den Elektromagnet selbst. Ein und derselbe Apparat wird, wie Fig. 267, zeigt, als

Fig. 267.



Manipulator und Receptor benutzt. Auf der Abgangsstation B geht der pos. Strom der Batterie D' durch die Schraube p und den Schlitten n n' zu dem Hufeisen, dessen beide Pole in m und m' sichtbar sind, und von diesem durch die Leitung L auf die Empfangstation A ebenfalls um das Hufeisen zu dem neg. Pole der Localbatterie D, während die anderen Pole der Batterien mit den Erdplatten P und P' verbunden sind; diese Einrichtung hat den Erfolg, daß jeder Apparat durch beide Batterien getrieben wird, daß also die Schwächung des Stromes der entfernten Batterie, der sogenannten Linienbatterie, durch die Leitung nicht merklich wird. Die Hufeisen werden durch den Stromschluß zu Magneten, ziehen die Anker a und a' an und drehen dadurch den Hebel d d' um den Punkt s nach oben, wodurch der Haken g in einen folgenden Zahn des Zeigerrades r gehoben wird. Zu gleicher Zeit wird durch die Hebeldrehung der Strom zwischen p und n unterbrochen, die Hufeisen verlieren ihren Magnetismus, die Anker werden nicht mehr angezogen und durch die Abreißfeder f in ihre frühere Lage zurückgeführt, wodurch der Haken g das Rad r in die Stellung dreht, daß der neugegriffene Zahn in die Lage des vorher gegriffenen gelangt und so der Zeiger auf dem Buchstabenkreise um einen Buchstaben weiter gedreht wird. Durch die Zurückdrehung des Hebels d d' ist nun der Strom zwischen p und n wieder geschlossen, und so wiederholt sich der ganze Vorgang in schneller Folge, so daß der Zeiger sich rasch auf dem Buchstabenkreise dreht, bis zu dem Buchstaben, dessen Taste niedergedrückt ist, und welche hierdurch den Zeiger festhält. Da auf beiden Stationen die Apparate in gleicher Weise wirken und vor dem Beginne des Telegraphirens auf das leere Feld zwischen A und Z gestellt sind, so weilt der Zeiger der Empfangstation immer auf dem Buchstaben, dessen Taste auf der Abgangstation niedergedrückt wird. — Um die Störungen, welche durch die chemischen Veränderungen der galv. Batterien im Telegraphenbetriebe entstehen, und die großen Kosten derselben zu vermeiden, hat Siemens einen magnetelektrischen Zeigertelegraph construirt. In diesem wird der Siemens'sche Inductionscylinder (532.) zwischen den Polen eines magn. Stahlmagazins mittels einer Kurbel gedreht, die sich über dem Buchstabenkreise befindet und so in dem Drahte des Inductors abwechselnd Ströme von entgegengesetzter Richtung hervorruft. Diese gehen durch die Leitung auf die Empfangstation und kreisen dort um einen um seine Achse drehbaren Elektromagnet, dessen Pole als hebelartige Ansätze zwischen den zwei entgegengesetzten Polen zweier Hufeisenstahlmagnete schweben und daher von diesen um einen kleinen Winkel gedreht werden; diese Drehung versetzt durch einen Hebel den Haken in einen folgenden Zahn des Zeigerrades, und da sie bei dem sofort erfolgenden entgegengesetzten Inductionsstrome auch umgekehrt wird, so zieht der Haken das Zeigerrad um einen Zahn weiter. — Diese Apparate ermöglichen eine große Geschwindigkeit des Telegraphirens; indessen beträgt doch die mittlere Geschwindigkeit der Zeigertelegraphen nur etwa 40 Buchstaben per Minute; außerdem werden alle Zeichen falsch, wenn durch irgend einen Unfall der correspondirende

Gang der Apparate auf beiden Stationen gestört wird; deßhalb werden die Zeigertelegraphen immer mehr von den Schreibtelegraphen verdrängt.

3. **Der Schreibtelegraph** von Morse enthält als Manipulator einen Apparat zum Schließen des Stromes für beliebig kurze und längere Zeit, den sogenannten Schlüssel (Fig. 268), und als Receptor den Schreibapparat (Fig. 269). Der Schlüssel dient dazu,

Fig. 268.

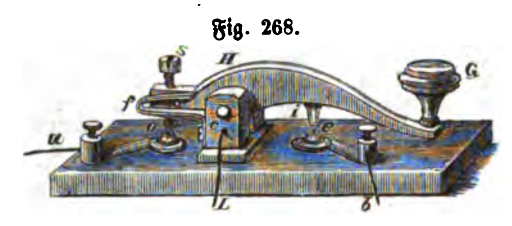
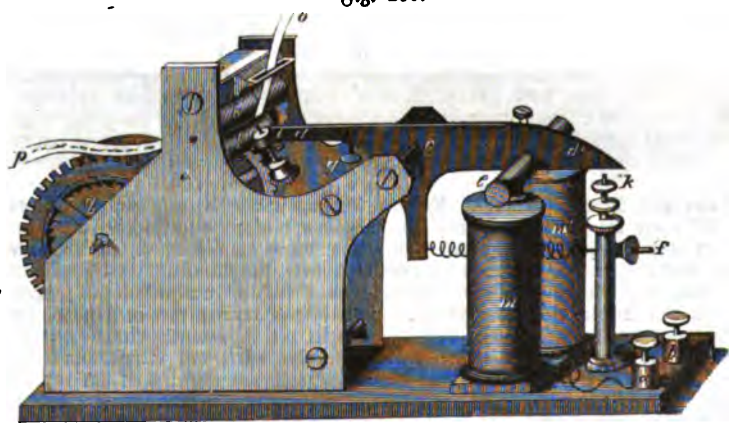


Fig. 269.

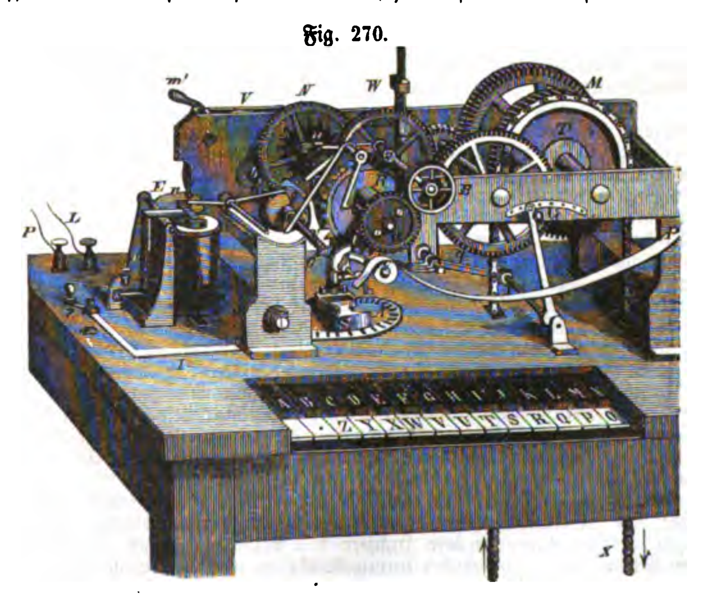


von der Abgangstation aus den Strom auf der Empfangstation nach Belieben für kürzere oder längere Zeit zu schließen. Zu diesem Zwecke geht der eine Poldraht der Batterie zu der Klemme b und der Leitungsdraht L an das Lager der Achse c, um welche sich der Hebel G H drehen kann. Wird mittels des Griffes G die rechte Seite dieses Hebels für kürzere oder längere Zeit niedergedrückt, so berühren sich die Nasen i und e, und der Strom fließt durch dieselben und den Hebel in den Leitungsdraht, und so auf die andere Station. Dort geht er um das Hufeisen m m′ des Receptors (Fig. 269), macht dasselbe für so lange Zeit zu einem Magnet, als der Griff g niedergedrückt ist. Hierdurch wird der Anker e und damit das eine Ende d′ des um c drehbaren Hebels d d′ niedergezogen und so das andere Ende d in die Höhe geschnellt. Dieses Ende trägt den Schreibstift i, dessen Spitze durch das Erheben für kürzere oder längere Zeit gegen den Papierstreifen o p gedrückt wird, der mittels eines Uhrwerkes q sich zwischen den 2 Walzen *l* und h langsam fortschiebt; bei dem kurzen Drucke des Stiftes entsteht auf dem Papier ein Punkt, bei dem langen ein Strich; aus solchen Punkten und Strichen ist das Morse'sche Alphabet zusammengesetzt. — Damit der Anker das Hufeisen nicht berühre, stößt das Hebelende d′ gegen den Stift k, und es wird demnach der Abreißfeder, die durch die Schraube f regulirt werden kann, leicht, ihn und den Hebel bei jeder Stromöffnung in die frühere Lage zurückzuführen. Auf jeder Station ist ein Schlüssel und ein Receptor in die Leitung eingeschaltet; zu dem Zwecke geht von der Klemme a des Schlüssels nach dem zweiten Batteriepole ein Draht, von dem eine Zweigleitung zu dem Hufeisen des Receptors derselben Station und von da in die Platte geht, während der Leitungsdraht auf der Empfangstation ebenfalls mit dem Lager des Schlüssels verbunden ist. Auf der Empfangstation hat der Schlüsselhebel die unveränderte Lage, in welche ihn die Feder f zurückführt, und in welcher die Schraube s die Nase o berührt, auf der Abgangstation beim Stromschlusse die niedergedrückte Lage. Es fließt dann der Strom von dem pos. Pole der Abgangsbatterie durch die Nasen i und e in die Leitung und dann auf der Empfangstation durch die Nase o an des Hufeisen,

dann in der Erde an die Abgangstation zurück und dort um das Hufeisen herum an den neg. Pol. Da bei diesem Stromlaufe beide Hufeisen immer durch eine Batterie versorgt werden, so ist der Strom häufig zu schwach für den Receptor der Empfangstation; deshalb wird mittels des Uebertragers oder Relais dieser Receptor mit der Batterie dieser Station verbunden; der Receptor wird nicht durch die Linienbatterie, sondern durch die Localbatterie getrieben, und jene hat nur die Aufgabe, mittels des Relais diese Verbindung herzustellen. Dieses besteht aus einem von dem Leitungsdrahte umwundenen Hufeisen, dessen Anker einen Theil eines sehr leicht drehbaren Hebels bildet, der an einem Ende mit dem einen Poldrahte der Localbatterie in Verbindung steht, während der andere zu einem ganz in der Nähe befindlichen Schraubenstifte geht. Der durch die mangelhafte Isolirung der Leitung geschwächte Linienstrom hat noch Kraft genug, den Hebel anzuziehen und dessen Ende mit dem Stifte in Berührung zu bringen; dadurch wird der Localstrom, in dessen Leitung der Receptor eingeschaltet ist, geschlossen. In dem polarisirten Schreibtelegraph von Siemens und Halske ist das Relais entbehrlich gemacht. Das Hufeisen steht hierin auf dem Nordpole eines plattenförmigen rechtwinkelig umgebogenen Stahlmagnetes, während der Schreibhebel durch den Südpol desselben und durch die beiden Hufeisenpole geht. Da diese schon durch Influenz permanente Nordpole sind und der Schreibhebel in ihrer Nähe einen permanenten Südpol hat, und da weiter die beiden Nordpole durch den Stromschluß abwechselnd aufgehoben und gestärkt werden, so erhält der Schreibhebel zwischen denselben ohne Abreißfeder eine hin- und hergehende Bewegung, welche wegen der Zusammenwirkung des permanenten und des el. Nordmagnetismus auf den Südpol des Hebels stark genug für den Druck des Schreibstiftes ist. Bei dem Farbschreiber von Siemens und Halske wird durch den Hebel eine in gefärbter Flüssigkeit rundlaufende Kreisscheibe für kürzere oder längere Zeit gehoben und gegen den Papierstreifen gedrückt, wodurch statt der Punkt- und Stricheindrücke farbige Punkte und Striche entstehen. — Die Schreibtelegraphen sind sehr einfach construirt, geben 80—100 Zeichen in der Minute, bedürfen aber einer längeren Einübung für das rasche Zeichengeben und für das Lesen, worin übrigens die Telegraphisten es zu solcher Gewandtheit bringen, daß sie bei dem älteren Stiftschreiber schon aus dem Klappern des Stiftes die Depesche erkennen. Diese Lesеübung ist bei den Drucktelegraphen nicht nöthig.

4. Der Drucktelegraph von Hughes besteht (Fig. 270) aus einem Tastenwerke mit Buchstaben als Manipulator, der mit dem sehr complicirten Receptor in ein Ganzes

Fig. 270.



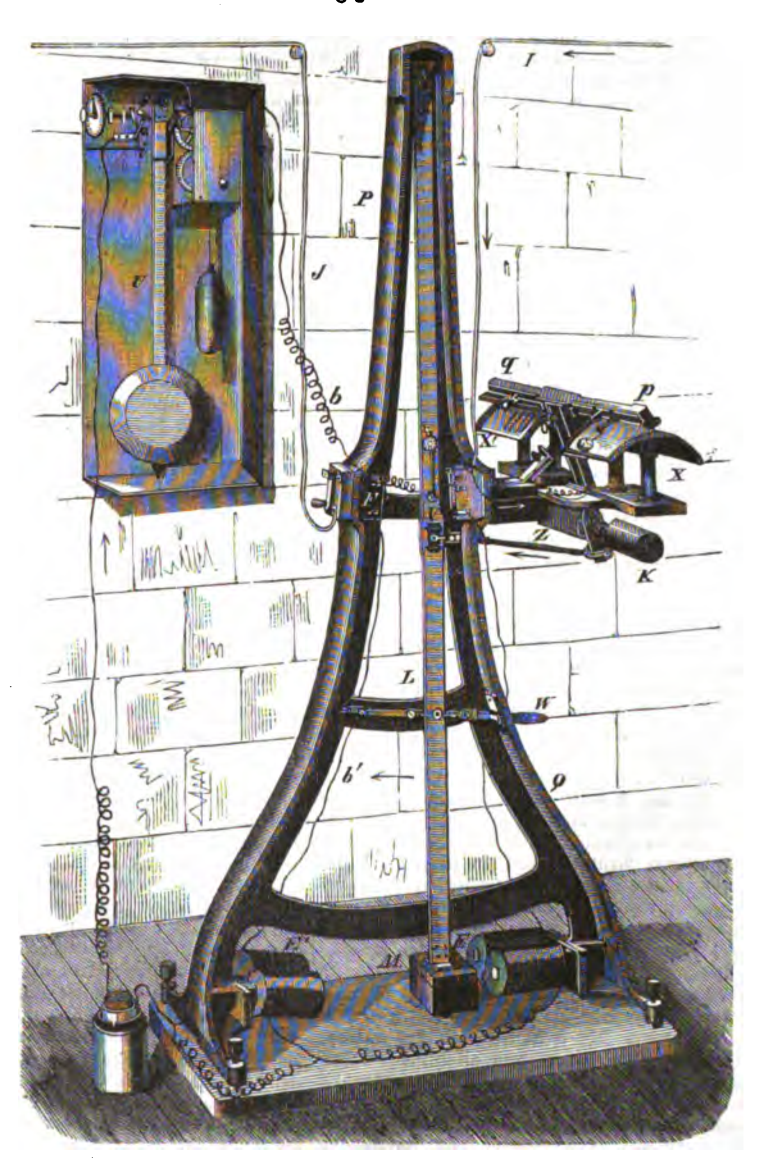
verbunden ist, das sowohl auf der Abgang-, wie auf der Empfangstation in ganz gleicher Weise aufgestellt ist und die Depesche auf beiden Stationen abdruckt. Der Receptor wird durch ein an der Kette x hängendes Gewicht bewegt, das zunächst die Achse des Ketten-

rades T und das Rad M dreht, welches mittels kleiner Getriebe und großer Räder eine 2te, 3te, 4te, 5te Achse in immer schnellere Umdrehung versetzt, so daß die 4te Achse, die Typenradachse mehr als 100, die 5te, die Daumenachse b_1 b' mehr als 700 Touren in 1 Min. macht. Diese letzte Achse, welche 4 Daumen trägt, wird nicht von einer einzigen Welle gebildet, sondern besteht aus 2 Wellen, der hinteren b_1, die mittels des Rades N in ihre schnelle Drehung versetzt wird, wenn das Uhrwerk aufgezogen ist, und der vorderen b', welche erst bei geschlossenem Strome durch das Schaltwerk ng mit der hinteren verkuppelt wird und dadurch an der schnellen Drehung derselben Theil nimmt; bei dieser Drehung greift der vorderste Daumen unter eine Gabel, und hebt mit derselben für einen Augenblick das Druckrad c mit dem Papierstreifen, und drückt diesen gegen das Typenrad a, das auf seinen 26 Zähnen die Buchstabentypen und ein blankes Feld enthält. Die Achse dieses Rades, die 4te oder Typenradachse besteht ebenfalls aus 2 Theilen; der hintere, der das Rad N trägt, dreht sich durch das Uhrwerk; der vordere, auf dem das Typenrad a sitzt, wird erst durch ein Schaltwerk, das von dem Daumen o ausgelöst wird, mit dem hinteren verkuppelt, und demnach erst bei dem Beginne des Telegraphirens gedreht. Der hintere Theil der Typenradachse setzt mittels zweier ganz gleichen conischen Räder eine verticale Achse, die Schlittenachse in Umdrehung, deren unterster Theil den Schlitten S auf der festsitzenden Stiftscheibe A umdreht, und zwar genau so schnell wie das Typenrad a. Die Stiftscheibe hat 26 Oeffnungen an ihrem Umfange; durch jede Oeffnung kann von unten her ein Stift herausdringen, der den oberen Theil des Schlittens S hebt. Dies geschieht mittels der Tasten; jede Taste drückt beim Niederdrucke des Telegraphisten auf einen Hebel, dessen Stützpunkt mit dem pos. Pole der Batterie verbunden ist, und hebt so mittels des Stiftes den Schlitten, wodurch der Strom nicht mehr wie vorher auf den unteren Theil der Schlittenachse und dadurch in die Erde, sondern durch den Schlitten auf den oberen Theil dieser Achse geht, der von dem unteren durch eine Elfenbeinplatte isolirt ist. Von der Achse geht der Strom durch die Elektromagneten E; diese sitzen auf dem Stahlmagneten, sind also permanente Magnete, die den Anker n anziehen und dadurch den Hebel ng unberührt lassen. Kreist aber der Strom, so verlieren sie ihren Magnetismus, der Anker n ist lose und wird durch die Abreißfeder r in die Höhe geschnellt, wodurch das andere Ende g des Hebels sich nach unten bewegt. Durch diese Bewegung wird durch ein Schaltwerk der vordere Theil der Daumenachse mit dem hinteren verkuppelt, macht eine schnelle Umdrehung und wirft mittels der Gabel das Druckrad c gegen das Typenrad, löst sich aber durch das Schaltwerk sofort wieder von dieser Verbindung ab, bis ein neuer Stromschluß durch das Niederdrücken einer Taste abermals die Kuppelung bewerkstelligt. Da nun der Strom von dem Elektromagnet der Abgangstation zur Leitung, dann in die Schlittenachse der Empfangstation und um deren Elektromagnet geht, so wiederholt sich hier gleichzeitig derselbe Vorgang. Bei jedem Niederdrücken einer Taste wird also auf beiden Stationen das Druckrad mit dem Papier gegen die unterste Stelle des Typenrades a gedrückt, auf welchem durch die Schwärzrolle B die Typen immer mit Druckschwärze bedeckt werden. Es kommt nun darauf an, daß in diesem Moment derjenige Buchstabe sich an der untersten Stelle des Typenrades befindet, dessen Taste niedergedrückt wird. Dies ist dadurch hervorgebracht, daß die Schlittenachse und die Typenachse dieselbe Drehung haben; dann ist die Stellung des Schlittens so regulirt, daß er über der Stiftöffnung der Taste „Blank" steht, wenn am Typenrade das Feld „Blank" nach unten gekehrt ist; da nun die Zahl der Oeffnungen der Stiftscheibe mit der der Zähne des Typenrades stimmt, so ist der Schlitten immer über derjenigen Oeffnung, deren Stifttaste denselben Buchstaben hat, der am Typenrade am untersten ist. Die Einstellung des Typenrades auf Blank, das Verkuppeln desselben mit der Typenachse, die Correction seiner Stellung durch das Correctionsrad R, das Fortschieben des Papieres, wenn ein Buchstabe gedruckt ist, geschieht durch die übrigen Nasen der Daumenachse, durch Hebel- und Schaltwerke, die wir ebenso, wie die gleiche Stellung der Apparate beider Stationen und andere Nebenelemente hier nicht erörtern können. Der Drucktelegraph kann 100 bis 200 Buchstaben per Minute drucken, wenn die Leitung nicht zu lang ist; auf vielen Hauptlinien ist er schon eingeführt.

5. Der Pantelegraph von Caselli. Die chemischen Telegraphen haben folgende Grundidee: Auf der einen Station wird der Strom durch einen Schlüssel für kürzere oder längere Zeit in dem Leitungsdrahte geschlossen; derselbe endigt auf der anderen Station mit einem Stifte, der einen mit leitender Flüssigkeit und mit einem zersetzbaren Stoffe getränkten Papierstreifen berührt; der el. Strom geht demnach durch das Papier auf eine leitende Unterlage und von da in die Erde; durch die chemische Zersetzung des Stoffes entsteht eine farbige Spur des Stiftes, die als Punkt oder Strich erscheint, wenn sich das Papier fortbewegt und der Strom für kurze oder längere Zeit geschlossen war. In Gintls chemischem Telegraph ist die Einrichtung des Morse'schen Receptors mit dieser Grund-

Idee verbunden, welche erlaubt, das immer neu zu regulirende und schwächende Relais wegzulassen. Der zersetzbare Stoff ist bei Gintl Cyankalium mit Salzsäure und Kochsalz, der Stift besteht aus Eisen und erzeugt durch seine Einwirkung das blaue Cyaneisensalz; doch wird auch Jodkalium mit Stärke verwendet. In Bakewells Copirtelegraph ist

Fig. 271.



das präparirte Papier um eine durch ein Uhrwerk bewegte Trommel geschlagen, die durch ein Zahnrad eine parallel neben ihr liegende Schraube dreht; auf dieser sitzt eine Mutter, die einen auf dem Papier schleifenden Stift trägt, welcher auf demselben eng neben einander liegende Spiralen beschreibt; die Stellen dieser Spiralen, an welchen der Strom

geschlossen ist, werden farbig. Das Schließen geschieht durch den ganz gleichen Manipulator auf der anderen Station, dessen Trommel ein leitendes Papier trägt, auf welches die Depesche mit nichtleitender Tinte geschrieben ist; der Strom ist also meist geschlossen, die Spiralen auf der anderen Station sind ganz blau mit Ausnahme der Stelle, bei welcher auf der ersten Station der Stift die Züge der Depesche berührte; dieselbe erscheint daher Weiß in Blau. Der Apparat hat keinen Eingang gefunden, weil die 2 Uhrwerke nicht in gleichen Gang zu bringen sind. Diese Aufgabe ist in Casellis Pantelegraph (Fig. 271) gelöst. Auf die hier unbewegliche Trommelfläche x ist an der Empfangstation das mit Blutlaugensalz getränkte Papier gebreitet, auf welchem der durch die Spindel pq gehaltene und in der Richtung pq fortbewegte Stift schleift; die Spindel wird mit ihrem Rahmen durch den nach unten gehenden Hebel auf der Trommelfläche hin- und hergedreht, der seine Bewegung von dem 2m langen Pendel L durch die Stange Z empfängt. Bei jedem Hin- und Hergange stößt eine im Hebel sitzende zweizinkige Gabel gegen Grenzstifte, greift dadurch mit ihren Haken in ein auf der Spindel sitzendes Zahnrad und dreht auf solche Weise dieses und die Spindel, so daß der Stift nach jeder Hin- und Herbewegung um 1/6mm verschoben wird und dadurch bei geschlossenem Strome eng neben einander liegende parallele Linien von Berliner Blau erzeugt. Die Bewegung des großen Pendels wird erhalten durch die beiden Elektromagnete E und E′, und regulirt durch das Uhrwerk U, dessen Pendel 4mal kürzer ist und daher doppelt so viel Schwingungen als das Pendel L macht. Der el. Strom der Localbatterie (unten links) geht durch die 2 Federn g und i dieses Uhrwerkes an die Schaltung F, die links und rechts an dem großen Pendelgestelle PQ in gleicher Art vorhanden ist. Bewegt sich das Pendel L nach links, so stößt die Gleitrolle V an demselben gegen eine Feder, welche dann 2 von einander getrennte Stellen der Stromleitung verbindet; der Strom geht jetzt an E′, macht dieses magnetisch, und zieht hierdurch die Pendellinse M an; in diesem Augenblicke hat auch das Pendel U eine Doppelschwingung vollendet, die Federn g und i trennen sich, und der Strom ist geöffnet, die Linse M fällt zurück; ihre Pendelstange schließt dann gleich den Strom für E an der Schaltung rechts, nachdem g und i in Berührung gekommen sind, E wird ein Magnet und zieht die Linse an. So regulirt das Pendel U die Bewegung des Telegraphen. Derselbe Apparat findet sich auch auf der Abgangstation; um kleine, unvermeidliche Abweichungen vom Synchronismus zu erkennen, ist auf das Papier derselben eine gerade Linie gezogen, die sich auf der Empfangstation wieder als gerade Linie abbilden muß; geschieht dies nicht, so kann man durch Drehung an der Pendelschraube bei U den identischen Gang wiederherstellen. Auf der Abgangstation wird die Depesche auf eine leitende Zinnfolie mit nichtleitender Tinte geschrieben. Der pos. Poldraht geht zur Hauptleitung, sendet aber einen Zweig an den Stift, während die Trommelfläche mit dem neg. Erddrahte verbunden ist. So lange der Stift das Zinn berührt, geht demnach der pos. Strom durch den Stift in den neg. Erddraht; sowie aber der Stift die Tinte berührt, geht der pos. Strom nicht in den Zweig, sondern in die Hauptleitung auf die Empfangstation, und bringt dann so lange eine blaue Spur auf dem Papiere hervor, als der Stift der Abgangstation die Tinte berührt; es wird demnach jede Zeichnung getreu durch blaue Spuren nachgebildet.

6. Der transatlantische Telegraph. Weil bei jedem Stromschlusse eine gewisse Menge von El. in einen Leitungsdraht geführt wird, die an dem anderen Ende desselben in die Erde fließen muß, und weil bei der Stromöffnung diese El. noch einige Zeit braucht, bis sie gänzlich durch Abfluß in die Erde neutralisirt ist, und endlich, weil erst nach geschehener Neutralisation ein zweites telegraphisches Zeichen möglich ist, so kann bei einer sehr langen Leitung ein zweites telegraphisches Zeichen nicht unmittelbar nach dem ersten gegeben werden; es muß einige Zeit verfließen, die um so länger sein wird, je länger die Drahtleitung ist und je mehr Kraft die einzelnen Zeichen bedürfen. Aus diesem Grunde gibt der Drucktelegraph von Hughes bei langen Leitungen nur 30—100 Zeichen gegen 100—200 auf kurzen Strecken. Soll nun ein Leitungsdraht durch die Erde oder durch Flüsse oder Meere gehen, so erfährt seine El. noch andere Wirkungen durch die Umgebung des Drahtes; derselbe muß nämlich eine isolirende Hülle von Guttapercha und über derselben zum Zwecke der Festigkeit und des Schutzes eine Hülle von Eisendraht erhalten. Die größte Sorgfalt wurde dem atlantischen Kabel 1865 gewidmet, da man aus mehreren verunglückten Kabellegungen das Nöthige erkannt hatte. Sieben Kupferdrähte wurden zu einem Seile verwunden, damit das Reißen eines Drahtes schadlos sei. Um die kleinsten Luftbläschen zwischen diesem Seile und der Guttaperchahülle unmöglich zu machen, wurde dasselbe zuerst mit einer Mischung von Guttapercha, Holztheer und Harz (Chatterton Compound) getränkt, was vor dem Aufpressen jeder der 4 Guttaperchahüllen wiederholt wurde. Die oberste Hülle erhielt einen dicken Ueberzug von Jutegarn mit Catechulösung gegerbt, und dieser Umzug wurde mit 10 Eisendrähten umwunden, von denen jeder mit 5 Strängen getheerten Manillahanfes umflochten war, um das Eisen vor dem Rosten zu schützen und

das sp. Gew. des Kabels zu verkleinern. Das Eisen mußte fest wie Stahl und zähe wie Schmiedeeisen sein; das Kabel wurde bei jedem weiteren Schritte auf Leitung, Isolation und Festigkeit in jedem Theile geprüft. In einem solchen Kabel nun wirkt die pos. El. der leitenden Kupferader durch Influenz auf das Eisen, stößt dessen pos. El. hinaus und zieht die neg. in die Guttapercha; durch diese erfährt nun die pos. El. der Leitung selbst eine Anziehung und dadurch eine Verzögerung, wodurch sie an entfernten Stellen der Leitung später auftritt und auch später verschwindet. Auch diese Wirkung ist um so stärker, je stärker die El. ist; demnach sind bei langen, submarinen Leitungen nur schwache Ströme anwendbar; schon deßhalb sind weder Elektromagnete, noch chemische Wirkungen für überseeische Telegraphen möglich; daher ist das nach dem Princip der Gauß'schen Spiegelablesung construirte Reflexgalvanometer von Thomson als Receptor für dieselben eingeführt worden. Ein noch nicht 2^{cm} langes und 3^{mm} breites und dickes Magnetstäbchen trägt ein kleines Glassilberspiegelchen, mit dem es zusammen noch nicht 1^{g} wiegt, und ist, von dem Strombrahtgewinde umgeben, in ein Gehäuse eingeschlossen, in dem es an einem Coconfaden hängt. In einiger Entfernung (1^{m}) steht ein breiter dunkler Schirm, hinter dem eine Lampe aufgestellt ist, von der durch einen etwas unter der Höhe des Spiegels angebrachten Spalt des Schirmes ein Lichtstrahlenbündel auf das Spiegelchen fällt, concentrirt durch eine vor demselben angebrachte Glaslinse; dieses Lichtbündel wird von dem Spiegelchen reflectirt auf eine etwas höher an dem Schirme angebrachte Elfenbeinskala, wo es eine schmale, leuchtende Linie, den Lichtzeiger bildet. Die Ablenkungen dieses Lichtzeigers von dem Nullpunkte nach links und rechts bilden die Elementarzeichen, aus denen das transatlantische Alphabet zusammengesetzt ist.

7. Elektrische Signale. Die Signalglocke mit einfachem Schlage besteht aus einem umwundenen Hufeisen, das beim Stromschlusse seinen federnden Anker anzieht und mit ihm einen an seiner Verlängerung befestigten Klöpfel, wodurch derselbe gegen eine Glocke schlägt, und beim Oeffnen des Stromes durch seine Federkraft wieder zurückgeht. Das Schließen geschieht durch einen Druck auf den Knopf, wodurch ein federnder Theil des Stromkreises gegen einen andern federnden Theil desselben gepreßt wird, welche beim Aufhören des Druckes wieder von einander gehen. Da man den Druck öfter wiederholen kann, so kann man mit diesem Apparat auch klingeln; doch gibt es auch selbstthätige Klingeln, die nach dem Princip des Wagner'schen Hammers construirt sind. Der pos. Poldraht steht mit einer Feder in Verbindung, die den ebenfalls federnden Anker mit Klöpfel berührt, der durch seine Federkraft etwas vom Hufeisen und der Glocke absteht; der Strom geht demnach durch Feder und Anker auf das Hufeisen an die neg. Klemme. Hierdurch wird der Anker angezogen und der Klöpfel gegen die Glocke geschlagen, gleichzeitig aber die Berührung mit der Feder und dadurch der Strom aufgehoben, weßhalb der Anker wieder zurückkehrt und so den Strom wieder schließt. Die el. Klingeln haben zahlreiche Anwendungen in Wohn- und Gasthäusern u. s. w. gefunden. Wichtig sind noch die Eisenbahnläutewerke, welche den Eisenbahnbeamten starke Glockensignale geben und durch Läuteinductoren (532.) getrieben werden; das verbreitetste (von Kramer 1847) besteht aus einer durch ein Gewicht gedrehten und von einem Windfange regulirten und gehemmten Walze, welche eine Schlußscheibe mit 12 Fallen (Einschnitten am Rande) dreht. In diese Fallen fällt der eine Arm eines Hebels, wenn der andere durch den Auslösehammer frei ist und hemmt so das Werk; wird aber der Auslösehammer durch die Anziehung eines Hufeisens beim Stromschlusse losgelassen, so fällt er auf den zweiten Arm des Hebels, der erste geht aus der Falle, die Walze dreht sich und setzt einen Klöpfel in Bewegung.

8. Die elektrische Uhr (Steinheil 1839). Die einfachste Construction von Siemens und Halske besteht aus einem vom Strombrahte umwundenen Hufeisen, das durch den Stromschluß magnetisch wird und dann einen Anker anzieht, welcher an einer Verlängerung einen rechtwinkelig auf dieser sitzenden Haken trägt und bei der Stromöffnung wieder in seine frühere Lage zurückkehrt. Der Haken greift in ein Zeigerrad, das 60 Zähne trägt, dreht dasselbe bei der ersten Bewegung um eine Zahnweite und geht bei der zweiten in den folgenden Zahn zurück. Wird also der Strom in einer Secunde 60mal geschlossen und geöffnet, so bewegt sich das Rad und mit ihm ein Zeiger in der Stunde einmal herum, gibt also die Minuten an. Diese Schließung wird von der Normaluhr, einer gewöhnlichen Pendeluhr besorgt; auf der Achse des Minutenrades derselben sitzt ein Elfenbeinrädchen, das mittels einer Nase in jeder Minute einmal auf den einen Arm eines Hebels drückt, an dessen Stützpunkt der eine Poldraht gelangt; durch diesen Druck wird der andere Arm des Hebels gehoben und dadurch in Verbindung mit der Stromleitung gebracht, der Strom geschlossen; ist die Nase an dem Hebel vorbei, so kehrt derselbe wieder in seine frühere Lage zurück, der Strom ist geöffnet.

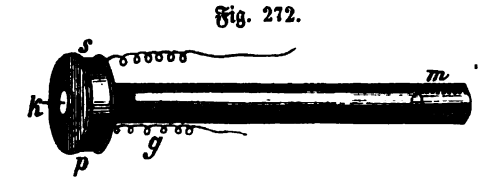
9. Das elektrische Chronoskop (Hipp 1850) mißt sehr kurze Zeiten, z. B. die Fallzeit einer aus geringer Höhe fallenden Kugel, die Zeit, in welcher eine abgeschossene

Kugel 1m zurücklegt u. drgl. Es besteht aus einem sehr feinen und genauen Uhrwerke, mit zwei Zifferblättern, welche Hundertel und Tausendtel von einer Sec. angeben, und welche durch einen Elektromagnet außer Verbindung mit dem Uhrwerke gesetzt werden, sowie der Strom desselben geschlossen ist. Wird aber dieser Strom für kurze Zeit geöffnet, so gehen die Zeiger wieder, und aus ihrem Wege erkennt man die Zeit der Stromöffnung. Um z. B. die Fallzeit zu messen, geht der Draht zuerst um das Hufeisen der Uhr, dann zu einem Galgen an 2 Federn, zwischen denen die Fallkugel sitzt, und dann zur Kette zurück; von den beiden letzten Drahttheilen gehen indeß auch Zweige zu 2 Theilen eines Brettes unter dem Galgen, die 2 sich nahezu berührende Metallstreifen tragen. Der Strom ist in diesem Falle oben an der Kugel geschlossen, an dem Doppelbrette aber nicht; sowie aber die Kugel fällt, wird oben der Strom geöffnet und erst wieder geschlossen, wenn die Kugel auf das Brett schlägt und dadurch die Metallstreifen in Berührung bringt. Die Zeit der Stromöffnung, die an den Zifferblättern abgelesen wird, ist die Fallzeit. Eine Anwendung dieses Princips wird auch an den Phonautographen gemacht.

10. Das Telephon (Philipp Reis 1860) ist ein interessanter Anfang zur Lösung der Aufgabe, Töne zu telegraphiren. Der Ton wird mittels eines Mundstückes in ein Holzkästchen geleitet, das oben durch eine Membran geschlossen ist, zu deren beiden Seiten die Poldrähte an Klemmen befestigt sind. An die eine Klemme geht von der Mitte der Membran ein dünnes Platinstreifchen, an die andere der eine Schenkel eines Platinwinkels, dessen Scheitel über der Membranmitte einen das Platinstreifchen beinahe berührenden Stift trägt. Da der Ton die Membran in Schwingungen versetzt, so wird durch jede hinreichend starke Schwingung das Streifchen gehoben und mit dem Stifte in Berührung gebracht; sind also die Schwingungen stark genug, so entstehen so viele Stromunterbrechungen, als der Ton Schwingungen enthält. Nun ist in den einen Poldraht an entfernter Stelle auf einem Resonanzboden eine Spirale mit einem Metallstäbchen eingeschaltet; in diesem wird durch die Stromunterbrechung der Ton reproducirt.

Das Telephon von Bell (1872—77) pflanzt nicht nur Töne, sondern auch die Sprache fort und zwar auf Strecken von 200, resp. 100 Kilometer. Dasselbe besteht (Fig. 272) aus einem starken Stahlmagnet mg mit einer Fortsetzung k aus weichem Eisen, auf welcher eine Spule sp sitzt, die zahlreiche Windungen eines feinen mit Seide übersponnenen Kupferdrahtes enthält. Ganz nahe vor der Vorderfläche der Spule und ihres Eisenkerns k befindet sich das Hauptelement des Apparates, eine sehr dünne, sehr elastische kreisförmige Eisenplatte oder Eisenlamelle, das Diaphragma. Vor dieser Lamelle befindet sich der Holzdeckel des Apparates, der in der Mitte eine trichterförmige Oeffnung trägt, an welche man den Mund hält beim Sprechen und das Ohr beim Hören. Dieser Holzdeckel drückt die Eisenlamelle mit ihrem Rande gegen die ringförmige Stirnfläche einer weiten die Spule umgebenden Holzröhre, so daß ein großer kreisförmiger Theil der Lamelle frei bleibt. An diese weite, kurze Holzröhre schließt sich eine engere und längere, die den Magnet umschließt, und welche an ihrem hinteren Ende 2 Klemmschrauben trägt, mit welchen die 2 Drahtenden der Spule verbunden sind. Von diesen Klemmschrauben gehen zwei Leitungsdrähte auf die andere Station an die Klemmschrauben eines ganz gleichen Apparates. Wird nun durch die Mundöffnung ein Schall in den Apparat geleitet, so geräth die Lamelle in Schwingungen, nähert und entfernt sich von dem nach Jamin polartig starken Kerne der Spule, wodurch ihr Influenzmagnetismus abwechselnd verstärkt und geschwächt wird. In Folge dessen wird auch der Magnetismus des empfindlichen, weichen Eisenkernes in dem Tempo und gemäß der Stärke der Schwingungen abwechselnd verstärkt und geschwächt. Jede Schwankung des Magnetismus des Eisenkerns aber erzeugt in der Spule Inductionsströme, die an Stärke und Dauer gerade so wechseln wie die Schwingungen der Lamelle. Diese Inductionsströme werden durch die Leitungsdrähte auf die andere Station in den Hörapparat geführt, fließen dort durch die Spule in demselben Wechsel von Stärke und Dauer wie in dem Sprechapparat und bringen daher in dem Kerne der Spule dieselben Schwankungen des Magnetismus hervor wie in dem Spulkerne des Sprechapparates. Deßhalb wird die Lamelle des Hörapparates bald stärker, bald schwächer, bald längere, bald kürzere Zeit angezogen, geräth daher in dieselben Schwingungen wie die Lamelle des Sprechapparates und bringt daher in der Luft am Hörapparat und so auf das Ohr dieselben Wirkungen hervor wie am Sprechapparat. Wegen der zweimal stattfindenden Uebergänge von Wellenbewegungen, wegen der zweifachen Verwandlung von Magnetismus und Elektricität, sowie

Fig. 272.



wegen des Leitungswiderstandes der Leitungsdrähte findet eine bedeutende Schwächung des Schalles statt.

Eine wesentliche nothwendige Ergänzung des Telephons ist der Anrufapparat, der auf der entfernten Station den Beginn des Telephonirens durch einen lauten Klang des Telephons anzeigt; solche Anrufer sind von Weinhold, Fein u. A. construirt worden und bestehen aus Spulen mit Kernen, in denen durch den Schall einer ganz nahen Klingel sehr starke Ströme inducirt werden, die in dem Telephon der anderen Station einen lauten Klang erzeugen. Das Telephon von Gray (1877), das nur Töne, aber objectiv hörbar telephonirt, und der Phonograph von Edison (1878), der die Sprache des Telephons für die Dauer aufzeichnet und sie nach beliebiger Zeit wieder hörbar macht, haben keine practische Bedeutung.

Zehnte Abtheilung.

Die Physik des Himmels (Astronomie).

1. Die Erde als Weltkörper.

536 Die Physik des Himmels betrachtet die Bewegungen und Eigenschaften der Welt- oder Himmelskörper. Unter Himmelskörpern versteht man Sonne, Mond und Sterne. Die Sterne kann man eintheilen in Fixsterne, Planeten, Kometen und Sternschnuppen. Der gewöhnliche Sprachgebrauch bezeichnet nur Fixsterne und Planeten mit dem Ausdrucke Sterne, da nur diese beiden Gattungen als leuchtende und strahlende Himmelspunkte erscheinen, während die Kometen als größere oder kleinere Lichtwolken, manchmal mit einem sternartigen Kerne, und die Sternschnuppen als plötzlich aufblitzende, schießende und rasch verschwindende Himmelsfunken auftreten. Fixsterne und Planeten sind für das gewöhnliche, natürliche Sehen nur darin verschieden, daß die Fixsterne zitterndes, die Planeten aber ruhiges Licht besitzen; bei längerer Beobachtung zeigt sich noch darin ein Unterschied, daß die Fixsterne ihre gegenseitige Stellung nicht merklich ändern, während die Planeten zwischen den Fixsternen hin- und herwandeln, ein Unterschied, von dem die Namen herrühren (πλανάομαι, herumschweifen). Da die Bewegungen der Weltkörper von der Erde aus beobachtet und gemessen werden, so müssen wir zuerst die Gestalt, Größe und Bewegung der Erde ins Auge fassen.

1. **Die Gestalt der Erde** (Pythagoras 540 v. Chr., Eudoxus 380 v. Chr., Aristoteles 384—322 v. Chr.). Die Erde ist eine frei im Weltraume schwebende Kugel. Daß sie frei im Weltraume schwebt, folgt daraus, daß wir an keiner Stelle eine materielle Verbindung mit einem anderen Weltkörper, sondern überall den freien Weltraum über uns wahrnehmen. Als Beweise für die Kugelgestalt werden gewöhnlich angeführt: 1. Der Horizont, d. i. der Theil der Erde, den wir überblicken können, hat überall eine kreisförmige Gestalt und einen viel kleineren Durchmesser, als er bei ebener Erdoberfläche haben müßte. 2. Der Horizont erweitert sich bei Erhöhung des Standpunktes. 3. Hohe Gegenstände, die aus großer Entfernung uns näher kommen, erscheinen zuerst mit ihrer Spitze und treten erst allmälig mit ihren unteren Theilen hinter dem Horizont hervor; die umgekehrte Erscheinung zeigen sie, wenn sie sich allmälig von uns entfernen. 4. Sonne, Mond und Sterne gehen an Orten, die in ostwestlicher Richtung eine verschiedene Lage haben, zu verschiedener Zeit auf und unter. 5. Bei raschem Reisen tauchen immer neue Sterne vor uns auf und sinken hinter uns unter den Horizont. 6. Bei den vielfachen Reisen, die nach allen Richtungen auf der Erde unternommen wurden, hat man niemals schroffe, sondern immer allmälige Ver-

änderungen der Erdoberfläche im großen Ganzen wahrgenommen, und gelangt beim Einhalten derselben Richtung nach derselben Gegend zurück. 7. Bei den Mondfinsternissen hat der auf den Mond fallende Erdschatten immer eine kreisförmige Begrenzung. 8. Sonne, Mond und Planeten haben Kugelgestalt. 9. Jede unabhängige Flüssigkeit nimmt Kugelgestalt an, und man hat Gründe zu der Annahme, daß die Erde einst flüssig war.

Bei Homer ist die Erde eine ruhende Scheibe, vom Okeanos umströmt; Thales (650 v. Chr.) hielt sie für eine auf Wasser schwimmende Scheibe, Anaximander (550 v. Chr.) für einen schwimmenden Cylinder. Pythagoras, Eudoxus und Aristoteles erklärten sie für eine Kugel. Ad 1 und 2. Wäre die Erdoberfläche eine Ebene, so würde der Horizont sich viel weiter als ½ Meile erstrecken, während ein auf freiem, ebenem Felde stehender Beobachter nur diese Entfernung ringsum durchblickt; außerdem würde eine Erhöhung des Standpunktes den Horizont nicht vergrößern. Wäre die Erdgestalt sehr von der Kugelgestalt verschieden, so müßte der Horizont nach verschiedenen Richtungen eine verschiedene Größe haben. Nur bei der Kugel ist er überall kreisförmig; denn der Horizont wird von den ins Auge gelangenden Lichtstrahlen begrenzt, welche an die Erde ringsum tangiren, und nur bei der Kugel bilden von jedem äußeren Punkte die an den Körper gezogenen Tangenten durch ihre Berührungspunkte einen Kreis. Eine Tangente ist nach einem bekannten geometrischen Satze die mittlere geometrische Proportionale zwischen der Höhe des Beobachters und der Summe dieser Höhe und des Erddurchmessers; kennt man also den Erddurchmesser, so kann man auch für jede Beobachtungshöhe die Weite des Horizontes berechnen, und findet dieselbe, abgesehen von den durch die Refraction entstehenden Abweichungen, der Beobachtung entsprechend. Ad 3. Wäre die Erde eine Scheibe, so müßte ein auf derselben näher kommender Gegenstand, z. B. ein Schiff, ein Inselberg wie der Pic von Teneriffa sofort ganz sichtbar sein; das allmälige Hervortreten, zuerst der Spitze, dann mittlerer Theile und endlich erst des Fußes spricht für die Krümmung der Erde. Auf einer Scheibe dürfte ein Gegenstand erst verschwinden, wenn (342.) sein Gesichtswinkel ½′ klein wäre, der Pic von Teneriffa also in 900 M. Entf., während er selbst mit den besten Fernrohren in 30 M. Entf. nicht mehr sichtbar ist. Ad 4. Wäre die Erde eine Ebene, so müßten die Himmelskörper für alle Erdbewohner gleichzeitig über den Horizont treten, und gleichzeitig hinter demselben verschwinden, nachdem sie ihre ostwestliche Bahn oberhalb des Horizontes beendigt hätten. Nun gehen aber für alle Erdbewohner, die in ostwestlicher Richtung gleich weit von einander entfernt sind, die Sonne und die übrigen Gestirne gleich viel später auf und unter, was nur möglich ist, wenn die Erde Kugelgestalt hat. Ad 5. Reist man in nordsüdlicher Richtung, so erheben sich nach gleichen zurückgelegten Wegen immer gleiche, durch neue Sterne bezeichnete und erkennbare Himmelsräume vor uns aus dem Horizont und verschwinden hinter uns unter dem Horizont; dies ist nur möglich, wenn die Erde nordsüdlich eine kreisförmige Krümmung hat. Die Abweichungen von dieser nicht ganz genau geltenden Regel werden wir sogleich näher betrachten. Bei Reisen in anderen Richtungen treten dieselben Erscheinungen ein, wenn man die ostwestliche Bewegung des Himmels abrechnet; folglich hat die Erde nach allen Seiten kreisförmige Krümmungen. Ad 6. Die schroffen Abstürze oder sanften Abhänge, die man in Gebirgen auf Reisen trifft, bilden keine Abweichung von der Kugelgestalt; sie sind gegen die Größe der Erde gehalten sehr klein. Die erste Umschiffung der Erde geschah durch Ferdinand Magelhaen (1519—22); seitdem geschahen noch viele Reisen um die Welt nach vielerlei Richtungen; immer gelangte man in entgegengesetzter Richtung an den Ort zurück, von dem man ausgegangen war. Ad 7. Auch andere Körper, wie Cylinder, Kegel können einen kreisförmigen Schatten werfen, aber nur in einzelnen ganz bestimmten Stellungen; der bei Mondfinsternissen auf den Mond fallende Erdschatten ist aber immer kreisförmig; einen kreisförmgen Schatten in allen Stellungen gibt nur die Kugel. Ad 8. Die Erde ist ein verhältnißmäßig kleiner Weltkörper; die Sonne, Jupiter und Saturn sind größer und haben Kugelgestalt; Venus und Merkur sind näher bei der Sonne und besitzen dieselbe Form; der Mars hat ungefähr dieselben Verhältnisse wie die Erde und ebenfalls Kugelgestalt; auch der Mond und die Satelliten des Jupiter stimmen in der Form mit den genannten Körpern überein. Wenn es nun auch sehr kleine von der Kugelform abweichende Weltkörper, die Sternschnuppen, und sehr große ganz abnorme Erscheinungen, wie die Kometen, von den seltsamsten Gestalten gibt, so ist doch die Kugelform bei den der Erde ähnlichen Weltkörpern so verbreitet, daß dieselbe auch für die Erde vermuthet werden muß. Ad 9. Die Geologen nehmen meist an, daß die Erde jetzt noch im Inneren feurigflüssig sei, und führen als Gründe für diese Hypothese an: die Zunahme der Erdwärme um 1° für je 100′ Entf. von der Oberfläche nach innen, die warmen Quellen, die Vulkane, die Erdbeben u. s. w. Ist die Erde jetzt noch im Inneren feurigflüssig, so

war sie einstens ganz flüssig, und mußte dann, wie jede unabhängige flüssige Masse, Tropfen, Plateaus Kugel u. s. w. Kugelgestalt annehmen. Die neuere neptunistische Schule erklärt die genannten Erscheinungen, ohne den feurigflüssigen Zustand zu Hilfe zu nehmen, durch die Wärme, welche das allmälige Zusammensinken der durch Sickerwasser locker werdenden Erdschichten erzeugt, benutzt also auch zur Erklärung der Kugelgestalt nicht den feurigflüssigen Urzustand der Erde; nach dieser Ansicht muß aber die Meeresoberfläche Kugelform haben, und was aus dem Meere hervorragt, muß durch Verwitterung sich der Meeresform anbequemen.

Da nach allen Richtungen über dem Horizont bei Nacht Himmelskörper wahrgenommen werden, deren Entfernungen von uns wir wegen der Größe derselben nicht abschätzen können und deßwegen für sehr groß und einander gleich halten, so erscheint uns der Himmel über dem Horizont als eine Halbkugel, und da für den Himmelsraum unter dem Horizont Gleiches gilt, so gewöhnen wir uns, den Himmel als eine um die Erde gespannte Hohlkugel anzusehen, deren Mittelpunkt mit dem der Erdkugel zusammenfällt. Himmel und Erde sind also concentrische Kugelflächen. Den Himmelspunkt über unserem Haupte, also den Endpunkt der Verlängerung unseres Erdradius bis an die Himmelskugel über uns, nennen wir Scheitelpunkt oder Zenith, den Endpunkt der Verlängerung bis an die Himmelsfläche unter uns dagegen Fußpunkt oder Nadir. Ginge man genau in einem Kreise um die Erde, so würden alle Scheitelpunkte genau einen concentrischen Himmelskreis bilden; nach dem Zurücklegen eines Halbkreises, eines Quadranten, eines Grades auf der Erde hätte auch das Zenith die Hälfte, einen Quadranten, einen Grad des Himmelskreises zurückgelegt, vorausgesetzt, daß die Erde eine vollkommene Kugel ist; die Scheitelpunkte zweier Erdorte sind am Himmel ebenso viele Bogengrade von einander entfernt als die Erdorte; man findet daher die Gradentfernung zweier Erdpunkte von einander, indem man die Grade des Bogens eines durch ihre beiden Zenithe gehenden größten Himmelskreises mit dem Theodolith mißt.

Die Gestalt der Erde ist nicht eine vollkommene Kugel, sondern an zwei diametralen Stellen abgeplattet; die Abplattung beträgt nach Bessel $1/299$, d. h. der kleinste Durchmesser ist um $1/299$ kleiner als der größte. Legt man in der Richtung des kleinsten Durchmessers Schnittebenen durch die Erde, so erscheinen dieselben als nach beiden Enden dieses Durchmessers hin schwächer gekrümmte, kreisähnliche Ellipsen. Dreht man eine Ellipse um den kleinsten Durchmesser, so entsteht ein Körper, den man Sphäroid nennt, und dessen Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser Kreise sind. Sind diese Schnitte bei der Erde auch Kreise, so ist die Erde ein sehr kugelähnliches Sphäroid. Die Abplattung wurde aufgefunden und bestimmt durch Gradmessungen; man fand, daß ein Grad eines durch den kleinsten Durchmesser gedachten Kreises in Lappland = 57437 Toisen, in Peru = 56753 Toisen, daß also der Grad nach Norden zu größer wird. Nachgewiesen wurde sie durch Pendelversuche: ein und dasselbe Pendel macht nach Norden zu immer mehr Schwingungen in derselben Zeit, und umgekehrt muß das Secundenpendel nach Norden zu länger gemacht werden (140.). Hieraus folgt, daß die Schwere nach Norden zu wächst, was sich nur durch Mitwirkung der Abplattung erklärt. Die Abplattung erklärt man durch die Wirkung der Centrifugalkraft im feurigflüssigen Zustande der Erde (Plateaus Versuch, die Kugel aus Blechringen auf der Schwungmaschine (141. u. 152.), eine Thonkugel auf einer Drehscheibe). Die genauere Untersuchung der Resultate älterer und neuerer Gradmessungen haben zu der Vermuthung geführt, daß die Abplattung an verschiedenen gleichweit nördlich gelegenen Orten nicht dieselbe ist, und daß die Schnitte senkrecht zu dem kleinsten Durchmesser ebenfalls nicht genau Kreise sind, daß also das Sphäroid nicht genau die Gestalt der Erde wiedergibt, daß die Erde in westöstlicher Richtung ebenfalls eine Art von Abplattung besitzt; zur genaueren Entscheidung über diese Vermuthung hat General Baeyer eine neue westöstliche Messung einer Länge von Irland bis zur Ostgrenze von Europa veranlaßt.

Die Abplattung wurde zuerst von Newton aus dem flüssigen Urzustande der Erde geschlossen und unter der Annahme, daß die Erde überall gleiche Dichtigkeit besitze, — $^1/_{230}$ berechnet. Durch Richers Reise von Paris nach Cayenne und zurück (1672) erhielt Newtons Schluß die erste Bestätigung. Richer fand nämlich, daß eine von Paris mitgenommene Uhr in Cayenne täglich 148 Sec. nachging, und für Cayenne regulirt, nach der Rückkehr nach Paris 148 Sec. vorging. Die hierin ausgesprochene Verminderung der Schwerkraft rührt aber nicht blos von der Abplattung, sondern auch von der Centrifugalkraft der Erde (78.) her. Die Centrifugalkraft allein vermindert die Schwere am Aequator um $^1/_{289}$; der an der Verminderung, welche bekanntlich $^1/_{200}$ beträgt, fehlende Betrag rührt von der Abplattung her. Berechnet man die Größe der Schwerkraft mit Berücksichtigung der Abplattung und der Centrifugalkraft an verschiedenen Orten der Erde, und bestimmt dieselbe dann mittels Pendelversuchen experimentell, so erhält man dieselben Resultate, worin eine Bestätigung der Abplattung und ihrer angegebenen Größe liegt. Die erste genauere Bestimmung wurde nach der ersten genauen Messung verschiedener Grade möglich; die peruanische Gradmessung geschah 1735 durch Bouguer, Condamine und Godin, die lappländische 1736 durch Maupertuis, Clairaut und Outhier. Aus diesen Messungen berechnete Bessel die Zahl $^1/_{299}$. Mit Berücksichtigung neuerer Gradmessungen findet James $^1/_{294}$, während Sabines (1823) Pendelversuche im hohen Norden $^1/_{289}$ ergeben.

Da die neuere neptunistische Geologie den feurigflüssigen Urzustand der Erde nicht annimmt, so gibt dieselbe eine andere Erklärung der Abplattung: Das Weltmeer muß, als vollkommen beweglich, durch die Rotation abgeplattete Kugelgestalt annehmen. Ueber der Meeresoberfläche findet Verwitterung durch Luft und Wasser und Erosion durch die Gletscher statt; verwitterte Massen werden aufgelöst und schwebend durch das Wasser der Flüsse in die Meere getragen, was um so mehr stattfindet, je kälter die Gegend ist. Hierdurch wird allmälig der feste Erdkörper der Gestalt des Weltmeeres genähert und nimmt so an der Abplattung desselben Antheil (Mohr 1865). Bischoff (1869) hält den Boden des Weltmeeres jetzt noch für rein kugelförmig, also der Abplattung entbehrend, und führt für diese Ansicht Tiefseemessungen an, nach denen das Meer in der Nähe des Aequators nahezu 2 Meilen, in dem höchsten Norden dagegen nur $^1/_{20}$ M. Tiefe hat und allmälig an Tiefe abnimmt. Doch wird gegen diese Erklärung unter vielem Anderen eingeworfen, daß sie die regelmäßige Lagerung der Erdmassen bis zum Mittelpunkte unerklärlich macht, die sich einfach aus dem flüssigen Zustande ergibt.

537 **2. Die Größe der Erde** (Eratosthenes 200 v. Chr., Bessel 1837). Aus der Länge eines Grades einer Kugel kann man durch Multiplication mit 360 die Länge des Umfanges eines größten Kreises und hieraus durch Division mit 2π den Halbmesser einer Kugel berechnen. Verwickelter wird die Methode bei einem Sphäroid. Bessel hat aus den 10 besten Gradmessungen, die $50^0\ 34'$ umfassen, den größten und den kleinsten Halbmesser berechnet und den ersten = 859,4367 M., den letzten = 856,5637 M., die Abplattung = 1 : 299,1518 gefunden. Der größte Durchmesser der Erde ist demnach 1719, der kleinste 1713 M.

Schon Eratosthenes hatte den Erdumfang zu 250 000 Stadien bestimmt; er beobachtete, daß zu Syene die Sonne zur Zeit des höchsten Sommers gerade im Zenith stand, während sie zu Alexandrien zu derselben Zeit $7^1/_2{}^0$ vom Zenith entfernt war. Hieraus schloß er, daß die beiden Orte $7^1/_2{}^0$ von einander entfernt seien, und da diese Entfernung 5000 Stadien betrug, so konnte er die Länge von 1^0 berechnen. Im 9. Jahrh. ließ der Kalif Al-Mamun einen Bogen von 2^0 mit Stäben sorgfältig messen. Fernel maß 1525 die Strecke von Paris bis Amiens durch die Zahl der Umdrehungen seiner Wagenräder, und fand so 1^0 = 57 070 Toisen. Genauer wurden die Messungen erst, als Snellius die Methode der Triangulation einführte, nach welcher die zu messende Strecke in ein Netz von Dreiecken gefaßt wird, von denen nur eine Seite, die Basis der ganzen Messung, mit größter Genauigkeit gemessen, die übrigen aber mittels der Basis und der ebenfalls durch die genauen Winkelinstrumente sehr genau auffindbaren Winkel berechnet werden. — Nach den Bessel'schen Zahlen ist die Oberfläche der Erde = 9 279 848 422, also beinahe = 10 M. Quadratmeilen und der Inhalt der Erde = 2650 Mill. Kubikmeilen. Wäre die Erde von Wasser, so würde sie 1 082 647 Trillionen, etwas mehr als 1 Quadrillion kg wiegen.

538 **3. Die Dichte der Erde** liegt nach zahlreichen Beobachtungen zwischen 5 und 7, d. h. die Erde wiegt 5—7mal soviel, als wenn sie von Wasser wäre, also 5—7 Quadrillionen kg. Da die Oberflächenschichten nur eine Dichte von 2—3 haben, so muß das Innere der Erde dichter sein. Die Methoden zur Bestimmung der Dichte sind folgende: 1. Die Drehwage oder das wagrechte Pendel unter dem Ein-

flusse der Anziehung sehr großer Gewichte. 2. Die Ablenkung eines Pendels durch einen Berg von bekannter Masse. 3. Die Vergleichung der Pendelschwingungen auf der Erdoberfläche mit solchen auf der Spitze eines Berges oder in der Tiefe eines Schachtes. 4. Das Horizontalpendel von Zöllner (1869) oder die Pendelwage von Lorenz Hengler (1832).

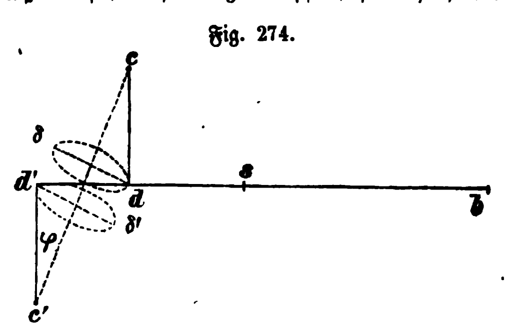
, 1. Die Methode der Drehwage von John Mitchell (1759) wurde zuerst von Cavendish (1797) angewendet; an einem stark construirten zweiarmigen Hebel befanden sich beiderseits Gewichte von mehr als 3 Ctr., zwischen denen an einem feinen Silberfaden ein leichter Hebel mit 2 kleinen Metallkugeln an den Enden schwebte. Die großen Kugeln wurden in eine solche Lage gebracht, daß die Verbindungslinie ihrer Mittelpunkte nicht senkrecht auf dem freien Hebel stand; dann wurden die kleinen Kugeln angezogen und so der kleine Hebel gedreht, wodurch derselbe durch Mitwirkung der Torsion in Schwingungen gerieth, die aus größerer Entfernung durch ein Fernrohr beobachtet wurden. Aus der Vergleichung dieser Schwingungszahl und der dieselbe erzeugenden Gewichte mit der Schwingungszahl eines gewöhnlichen Pendels konnte man das Gewicht der Erde berechnen, und Cavendish fand so die Erddichte = 5,45. Dieselbe Methode, vervollkommnet und mit Berücksichtigung aller Fehlerquellen, schlug Reich (1838) ein und fand 5,44, während Bailys (1842) zahlreiche Versuche die etwas größere Zahl 5,66 ergaben. — 2. Maskelyne und Hutton (1772) hängten zu beiden Seiten des Berges Shehallian in Pertshire an Punkten, deren linearer und Bogenabstand genau gemessen war, Pendel auf. Durch den Berg wurden die Pendel etwas aus ihrer Lage seitwärts nach dem Berge zu abgelenkt, machten also einen größeren Winkel mit einander als den Bogenabstand der beiden Punkte. Durch Fernrohre, die in die Richtung der Pendel gebracht wurden, bestimmte Maskelyne diesen Winkel, indem er den Abstand der beiden Sterne maß, auf welche die Fernrohre gerichtet waren. Die Differenz dieses Winkels und des Bogenabstandes der beiden Standpunkte gab die Ablenkung der Pendel an. Zieht man nun von dem Drehpunkte eines Pendels eine Linie nach dem Mittelpunkte der Erde, und verlängert das Pendel bis an die Erdoberfläche, so ist der Abstand der Fußpunkte dieser beiden Linien auf der Erdoberfläche ebenfalls ein Maß für die Ablenkung durch den Berg, während in der zweiten Linie die Wirkung der Erde dargestellt ist; man kennt sonach das Verhältniß der beiden Wirkungen. Die eine Wirkung wurde durch das Gewicht des Berges hervorgebracht, das man wegen dessen regelmäßiger Form, und soviel sich beurtheilen ließ, gleichmäßiger Dichte berechnen konnte; aus diesem Gewichte ließ sich sodann die Ursache der anderen Wirkung, das Erdgewicht berechnen. Es ergab sich 4,74, während James aus Arbeiten von Arthur Seat (1865) die Zahl 5,2 erhielt. Diese Resultate sind weniger zuverlässig, weil man das Innere des Berges nicht genau kennt. — 3. Diese Methode beruht darauf, daß die Länge des Secundenpendels an verschiedenen Orten der Anziehung proportional ist, und daß diese Anziehung der Masse direct und dem Quadrat der Entfernung umgekehrt proportional ist. Ist das Volumen, die Dichte, der Radius der Erde = V, D, R, dagegen für einen Berg das Vol. v, die Dichte d, die Entf. des Schwerpunktes vom Gipfel = r, die Pendellänge auf der Erdoberfläche = l, die auf dem Berggipfel nöthige Verlängerung = λ, so ist $\lambda : l = (dv : r^2) : (DV : R^2)$, woraus $D = dvlR^2 : V\lambda r^2$, wonach D zu berechnen ist. Carlini verglich (1824) die Pendellänge auf dem Mont-Cenis mit derjenigen in Bordeaux und fand D = 4,4. Airy ließ sein Pendel (1854) auf der Erdoberfläche und auf dem Boden eines 400^m tiefen Schachtes schwingen und fand D = 6,57. — Die Ungleichheiten rühren von der verschiedenen Dichte der Erde an verschiedenen Orten her, die auf das Pendel wirken; über großen Eisenlagern schwingt das Pendel schneller, über großen Weltmeeren langsamer. Die Verschiedenheit der Dichte an der Oberfläche und im Inneren erklärt auch, daß Newton die Abplattung aus theoretischen Rechnungen größer fand als sie ist; er nahm die Gesammtdichte der Erde = derjenigen der Oberflächenschichten, wodurch die anziehende Wirkung der inneren Massen kleiner und dadurch die Wirkung der Schwungkraft der äußeren Massen verhältnißmäßig größer wurde.

4. Große Erwartungen hinsichtlich des Nachweises astronomischer Eigenschaften und der genauen Lösung astronomischer und terrestrischer Größenfragen hegt man von dem Horizontalpendel, das schon vor fast 50 Jahren von Hengler in München erfunden und unter dem Namen Pendelwage zu Demonstrationen der physischen Astronomie benutzt worden, jedoch ganz verschollen war, aber von Zöllner neu erfunden, vervollkommnet und zu zahlreichen Anwendungen geeignet erklärt wurde. Man denke sich eine Stange nicht weit von ihrem einen Ende an einem Faden aufgehängt; dann wird ihr längerer Theil herabhängen. Befestigt man nun im Endpunkte des kürzeren Theiles an dessen unterer Seite einen zweiten Faden, so kann man mittels desselben den kürzeren Theil herab und den längeren hinauf ziehen, so lange bis der Hebel wagrecht hängt. Wird sodann dieser zweite Faden

an einem tiefer liegenden Punkte angehängt, so hat man das Horizontalpendel (Fig. 273 und 274). Sind die beiden Aufhängepunkte c und c′ in einer Lothrechten (Fig. 273), so dreht sich das Pendel, wenn man es bei b faßt und immer voranzieht, in einer horizontalen Kreisebene um die Achse cc′; denn jeder der beiden schiefen Fäden cd und c′d′ behält seine Länge und dreht sich um die Achse cc′, beschreibt also einen Kegelmantel; daher beschreiben die Befestigungspunkte d und d′ auf der Achse senkrechte, d. i. wagrechte Kreisebenen, also auch alle Punkte von dd′ oder von d′db; folglich wird der Schwerpunkt s des Hebels weder gehoben, noch gesenkt, der Hebel bleibt in jeder Lage, abgesehen von der Torsion, in Ruhe, er ist in indifferentem Gleichgewichte, wie jede Drehwage. Er kann daher auch wie jede Drehwage durch die geringste Kraft aus seiner Lage gebracht werden; jedoch unterscheidet er sich von der Drehwage vortheilhaft darin, daß bei dieser die Wirkungen paralleler Kräfte z. B. der Anziehung des Mondes oder der Sonne, der elektrischen oder magnetischen Kräfte der Erde u. s. w. sich gegenseitig aufheben, da sie auf beide Seiten dieses 2armigen Hebels gleich stark, aber entgegengesetzt drehend wirken, während das Horizontalpendel als einarmiger Hebel von solchen Kräften nur auf der einen Seite ergriffen wird und daher durch die geringste Kraft schon eine starke Veränderung erfährt; seine Empfindlichkeit ist, abgesehen von der Torsion, unendlich groß. Indessen läßt es sich auch weniger empfindlich machen, und zwar einfach dadurch, daß wie in Fig. 274 die beiden Aufhängepunkte c und c′ nicht lothrecht über einander angebracht werden. Bei einer Drehung des Hebels d′db beschreiben auch hier die Fäden cd und c′d′ Kegelmäntel und ihre Endpunkte d und d′ Kreise, die auf der Kegelachse senkrecht stehen. Diese Kreise sind jedoch nicht wagrecht, weil die Achse nicht lothrecht ist. Nach einer halben Drehung z. B. ist d nach δ, seiner höchsten Lage gelangt und senkt sich bei weiterer Drehung wieder bis in die tiefste Lage d; ebenso hebt sich auch d schon, wenn der Hebel nur wenig aus seiner ursprünglichen Lage gebracht wird. Da aber der Schwerpunkt s des ganzen Pendels auf derselben Seite der Achse wie d liegt, so muß sich auch s bei jeder Drehung des Hebels aus seiner ursprünglichen Lage heben. Ein gehobener Schwerpunkt, der nicht unterstützt ist, fällt in die tiefste Lage zurück; folglich kehrt das Pendel nach jeder Ablenkung vermöge der Schwere in die ursprüngliche Lage zurück, es ist in dieser Lage in stabilem Gleichgewichte. Die Rückkehr geschieht durch Schwingungen, wodurch die genauen Beobachtungs- und Rechnungsmethoden der Schwingungslehre hier Anwendung finden. Wegen der stabilen Gleichgewichtslage ist diese Einrichtung weniger empfindlich als das Pendel mit lothrechter Achse; jedoch kann seine Empfindlichkeit nach Belieben gesteigert werden, indem man die Achse cc′ beliebig der Lothrechten nähert; dadurch wird die Hebung des Schwerpunktes bei kleinen Ablenkungen und daher auch die Arbeit für diese Hebung beliebig klein, so daß dieselbe schon von kleinsten Kräften geleistet werden kann. Schärfer erhellt dies aus der Theorie des Horizontalpendels (Stoll 1876): Das ursprünglich in horizontaler Lage befindliche Pendel beschreibt bei einer ganzen Umdrehung den Mantel eines Rotationskegels, dessen Achse cc′ (Fig. 274) um den $\measuredangle\ \varphi$ gegen die Lothrechte geneigt ist, sein Schwerpunkt s also einen Kreis, dessen Ebene ein auf der Rotationsachse cc′ senkrechter Schnitt des Kegels und um den $\measuredangle\ \varphi$ gegen die Horizontalebene geneigt ist. In Fig. 275 sei dieser Kreis durch $s\varepsilon\sigma$ dargestellt, sein Mittelpunkt sei o′, seine Achse oo′, wobei o den Punkt bedeute, in welchem die Achse die durch s gehende Horizontalebene schneidet. Bei der Drehung des Pendels um den Horizontalwinkel α gelange s nach σ. Beschreibt man nun mit dem Halbmesser os in jener Horizontalebene den Bogen $s\sigma'$, der den $\measuredangle\ \alpha$ mißt, verbindet den

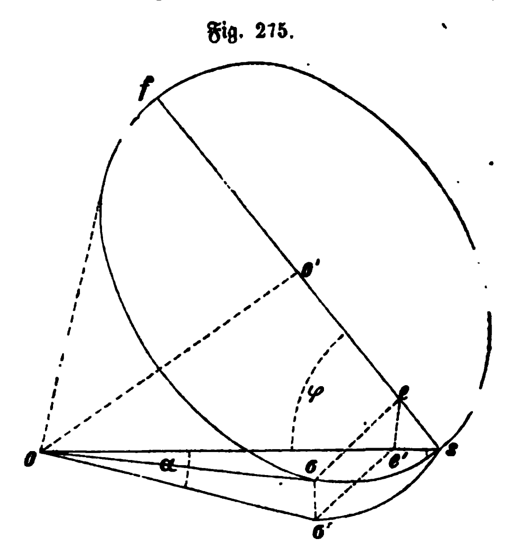
Fig. 273.

Fig. 274.



Endpunkt σ' mit σ, so liegt, wenn α hinreichend klein genommen wird, σ nahezu senkrecht über σ', und es ist nahezu $o\sigma = o\sigma' = os = r$. Legt man ferner durch $\sigma\sigma'$ eine Ebene, die senkrecht auf os steht, so ist $\sigma\sigma' = ee' = e's \tan \varphi$. Wenn nun der Schwerpunkt aus der Lage σ in die Lage s zurückschwingt, so erlangt er dort eine Geschw. v_1, die so groß ist, als ob er senkrecht im freien Falle durch $\sigma\sigma'$ herabgefallen wäre, und die also gefunden wird durch die Formel $v_1^2 = 2g \,.\, \sigma\sigma' = 2g \,.\, e's \tan \varphi$. Gibt man einem gewöhnlichen Verticalpendel von derselben Länge r die nämliche Elongation α, so erlangt sein Schwerpunkt in der tiefsten Lage eine Geschw. v, die durch die Fl. $v^2 = 2g \,.\, e's$ gefunden wird; daher entsteht die Prop. $v^2 : v_1^2 = g : g \tan \varphi$. Bei zwei Pendeln von gleicher Länge aber, die aus gleicher Elongation durch verschiedene beschleunigende Kräfte g und g' zurückkehren, besteht nach derselben Formel auch die Prop. $v^2 : v_1^2 = g : g'$, woraus sich ergibt, daß die beschleunigende Kraft des Horizontalpendels $g' = g \tan \varphi$. Wenn demnach der $\measuredangle \varphi$ sehr klein ist, so ist auch die Kraft, welche das Pendel zurückführt, sehr klein, und kann demnach das Pendel durch die geringste Kraft aus seiner Lage abgelenkt und daher zum Nachweise kleinster Kräfte benutzt werden. Für die Schwingzeit gilt die Formel $t = \pi \sqrt{(l : g \tan \varphi)}$, woraus ersichtlich ist, daß das Horizontalpendel bei einem kleinen φ bedeutend langsamer schwingt als ein Verticalpendel von gleicher Länge, wodurch die Genauigkeit der Beobachtung wesentlich gefördert wird. Wird φ größer als 45°, so wird die Schwingzeit kleiner als beim Verticalpendel und kann durch wachsendes φ zu beliebiger Kleinheit herabgehen. Man kann sich leicht durch den Versuch überzeugen, daß bei sehr schiefer Lage der Rotationsachse die Schwingungen des Horizontalpendels viel rascher als die des V.-P. geschehen; doch ist dies unwesentlich, da dann die zurückführende Kraft in demselben Maße zunimmt und daher keine Anwendung zuläßt. Die Anwendung setzt ein kleines φ voraus, da alsdann die kleinste Kraft schon zur Ablenkung ausreicht; da das Pendel durch die Schwerkraft zurückgeführt wird, so muß auch die geringste Aenderung derselben sich schon in den Schwingungen des Pendels abspiegeln; daher ist es anwendbar zur Erkennung von Aenderungen der Schwere und der Centrifugalkraft der Erde, zum Messen der Erddichte und der Erdbeben, zum Nachweise der Erdbewegungen. Dann ist es wegen seiner Empfindlichkeit und seiner einarmigen Beschaffenheit verwendbar, um die Verschiedenheit der Anziehung von Sonne oder Mond in versch. Entfernungen, sodann diese Entf. selbst und die Massen von Sonne und Mond zu bestimmen, ja man hofft sogar die Schnelligkeit der Fortpflanzung der Gravitation mittels desselben auffinden zu können. Die große Empfindlichkeit, welche es für solche Messungen haben muß, ist allerdings auch eine Fehlerquelle, da es alsdann von allen Massenwirkungen des öffentlichen Lebens, von Luft, Wärme und Licht beeinflußt wird; so zeigte Zöllners Pendel in dem Keller der Leipziger Sternwarte schon eine Ablenkung, als der Hörsaal sich füllte; daher wird das Horizontalpendel der Sonnenwarte (Observatorium für physische Astronomie) bei Potsdam in einem 100' tief gelegenen unterirdischen Raume angebracht.

Fig. 275.



4. Die tägliche Bewegung, Achsendrehung oder Rotation der Erde (Aristarch aus Samos 279 v. Chr., Copernicus 1543). 539 Die Erde hat zwei Bewegungen, eine tägliche Drehung um sich selbst und eine jährliche drehende Bewegung um die Sonne; die erstere nennt man auch Achsendrehung oder Rotation, die letztere Umlauf oder Revolution. Die Rotation besteht darin, daß alle Punkte der Erde in gleicher Zeit, in einem Sterntage, vollständige Kreise beschreiben, mit Ausnahme der Punkte des kleinsten Durchmessers, den man deßhalb auch die Erdachse nennt. Die Erdachse ist also die gerade Verbindungslinie aller Punkte der Erde, welche bei der täglichen

Drehung der Erde in Ruhe bleiben; die beiden Endpunkte der Achse auf der Oberfläche heißen Pole, der auf der nördlichen Halbkugel liegende Pol der Nordpol, der andere Südpol. Die Achse enthält die Mittelpunkte aller von den Erdpunkten beschriebenen Kreise, deren Größe mit der Entfernung der Punkte von der Achse zunimmt. Die von den Oberflächenpunkten beschriebenen Kreise werden Parallelkreise genannt; der größte derselben, der in der Mitte zwischen Nord- und Südpol liegt, heißt Aequator. Derselbe wird, wie jeder Kreis in 360 Grade getheilt und ist, da jeder Grad in 15 geogr. M. getheilt ist, 5400 M. lang. Kreise, welche durch die Erdachse gelegt sind, werden Mittagslinien oder Meridiane genannt; der Meridian eines bestimmten Ortes geht durch diesen Ort und die beiden Pole. Die Parallelkreise, welche $23^1/_2{}^0$ der Meridiane von den Polen abstehen, heißen Polarkreise; die, welche $23^1/_2{}^0$ vom Aeq. entfernt sind, Wendekreise, und zwar der nördliche Wendekreis des Krebses, der südliche Wendekreis des Steinbocks. Meridiane und Parallelkreise dienen auch zur Ortsbestimmung auf der Erde; man kennt die Lage eines Ortes, wenn man seine Entfernungen von 2 sich senkrecht durchschneidenden festen Linien kennt. Als solche Linien sind festgestellt der Aequator und der Meridian von Ferro (oder Greenwich). Den Bogenabstand eines Ortes vom Aequator, auf dem Meridian des Ortes gemessen, nennt man die geographische Breite; den Bogenabstand eines Ortes vom ersten Meridian, auf dem Parallel des Ortes gemessen, nennt man die geographische Länge.

Positive Beweise für die Drehung der Erde um sich selbst sind: 1. Newtons Fallversuch: Wenn die Erde sich um sich selbst dreht, so muß ein Stein auf der Spitze eines Thurmes eine größere westöstliche Geschwindigkeit haben, als am Fuße desselben; da nun nach dem Gesetze der Trägheit ein fallender Stein seine Geschwindigkeit während des Falles nicht ändert, so muß er etwas östlich von dem Fußpunkte des Lothes zu Boden fallen. Aus dem Radius der Erde und der Höhe des Thurmes läßt sich diese Abweichung berechnen. Bei den Versuchen von Benzenberg (1802) am Michaelisthurme in Hamburg und von Reich (1832) in einem 488′ tiefen Schachte bei Freiberg stimmten die Resultate sowohl der Art als der Größe nach mit der Rechnung überein. Da während des Falles der Stein nach dem Gesetze der Trägheit in der Richtung der Tangente seines Parallelkreises weiter geht, so muß er auch etwas südlich vom Fußpunkte des Lothes zu Boden fallen, was Reichs Versuche bestätigen. — 2. Foucaults Pendelversuch (1851). Nach dem Gesetze der Trägheit kann ein Pendel seine Schwingungsebene nicht von selbst ändern; folglich muß diese Schwingungsebene ihre Lage gegen den Meridian ändern. Diese Aenderung ist dem Sinus der geogr. Breite proportional, kann also für jeden Ort berechnet werden. Da sie an allen Orten durch Versuche sich genau so groß wie durch die Rechnung ergibt, so ist die Voraussetzung der letzteren, die Rotation der Erde hierdurch bewiesen (140. 10). — 3. Henglers Pendelwageversuch. Weil die Centrifugalkraft die Richtung des Radius des Parallelkreises hat und diese auf unserer Halbkugel von dem Radius der Erde nach Süden abweicht, so hat die Schwungkraft auch eine südlich gerichtete Componente, die in größerer Höhe mit der Centrifugalkraft wächst. Wenn sich demnach die Erde wirklich dreht, so muß ein in größere Höhe gebrachter Körper ein größeres Streben nach Süden haben als vorher. Das Horizontalpendel allein ist empfindlich genug, diesen geringen Unterschied auffällig wahrnehmbar zu machen und so einen neuen directen Beweis zu ermöglichen. Als Hengler demselben eine westöstliche Richtung gab, und ein am Ende tief hinab hängendes Gewicht in die Höhe zog, zeigte sich eine deutliche Pendelablenkung nach Süden; dasselbe muß stattfinden, wenn man den Gewichtsfaden durchbrennt. — 4. Die Abnahme der Schwere vom Aequator nach den Polen zu hat zwei Ursachen: die Abplattung und die Centrifugalkraft; die Centrifugalkraft vermindert die Schwere gemäß der Größe des Radius des Parallelkreises und gemäß dem Winkel, den dieser Radius mit dem betreffenden Erdradius macht. Man kann für jeden Erdpunkt diese Verminderung berechnen, und findet sie durch Pendelversuche bestätigt; hierdurch wird die Richtigkeit der Voraussetzung, die Abplattung und die Rotation bewiesen. — 5. Die Abplattung der Erde ist nur durch die Rotation derselben erklärlich, einerlei ob man sie durch Rotation der feurigflüssigen Kugel oder durch Erosion der aus dem Weltmeere herausragenden Polargegenden erklärt, da die Abplattung des Weltmeeres auch nur durch die Rotation erfolgen kann. Bestätigungen dieser Erklärungen liegen in der großen Abplattung der rasch rotirenden Planeten und in der kleinen Abplattung der langsam rotirenden Planeten. — 6. Die

östliche Wendung der Nord- und die westliche der Südwinde. Südwinde kommen bei uns aus Gegenden größerer westöstlicher Geschwindigkeit nach Gegenden von geringer Geschw., müssen aber nach dem Gesetze der Trägheit ihre frühere Geschw. noch beibehalten und daher rascher nach Osten laufen als wir, und sonach allmälig westlich werden. Aus dem entgegengesetzten Grunde müssen Nordwinde unter Voraussetzung der Drehung der Erde östlich werden. Da diese Wendung bei allen Nord- und Südwinden unzweifelhaft fest steht, so ist hiermit die Voraussetzung derselben, die Drehung der Erde bewiesen. — Negative Beweise für die Rotation der Erde sind: die Drehung aller Gestirne in gleicher Zeit um die Erde. Die Gestirne haben die verschiedenste Entfernung von der Erde und drehen sich alle in gleicher Zeit von Osten nach Westen um dieselbe; dies erklärt sich einfach durch die Drehung der Erde um sich selbst, bleibt aber ohne diese unerklärlich. – Die Fixsterne sind Billionen, die Sonne Millionen, der Mond Tausende von Meilen von uns entfernt; würden sie sich in Wahrheit um die Erde drehen, so müßten die Fixsterne unendlich große Geschwindigkeiten haben, und die unendliche Zahl der verschiedenen Fixsterne, deren Entfernungen von uns sehr verschieden sind, die Sonne, die Planeten, der Mond müßten so gegen einander abgemessene Geschwindigkeiten besitzen, daß sie die verschiedensten Wege in gleichen Zeiten durchlaufen könnten. Dies ist nicht denkbar; durch die Drehung der Erde aber erklärt sich die Erscheinung sehr einfach. — Um die gewaltige tägliche drehende Bewegung aller Gestirne um die Erde zu erklären, müßte eine überaus große anziehende Kraft in der Erde angenommen werden, welche nicht vorhanden ist; außerdem müßte diese Kraft auf die entfernteren Körper viel stärker wirken als auf die näheren, was aller Erfahrung widerspricht; endlich drehen sich auch die meisten Gestirne in täglichen Kreisen, deren Mittelpunkte weit außerhalb der Erde liegen, an Stellen, wo keine Kräfte wirken. Die Annahme der Rotation der Erde löst alle diese Widersprüche.

Die Rotation der Erde wurde schon von manchen griechischen Astronomen angenommen, von Ptolemäus aber widerlegt; im Mittelalter hat Nicolaus de Cusa die Lehre von der Bewegung der Erde einmal besprochen; allein erst Copernicus hat dieselbe consequent durchgeführt.

Dieselben Linien, die auf der Erdkugel als Grundlage aller Messungen dienen, hat man auch an der concentrischen Himmelskugel eingeführt. Die Verlängerung der Erdachse durch den ganzen Himmelsraum nennt man Weltachse; die Punkte, wo sie die Himmelskugel schneidet, also die Zenithe des irdischen Nord- und Südpoles nennt man Nordpol und Südpol des Himmels. Die Verbindungslinie der Zenithe aller Punkte des Erdäquators bildet den Himmelsäquator, einen größten Himmelskreis, der genau in der Mitte zwischen Nord- und Südpol die Himmelskugel halbirt. Kreise durch einzelne Punkte des Himmels parallel zu dem Himmelsäquator sind Himmelsparallelen, größte Kreise durch solche Punkte und die beiden Himmelspole gelegt sind Himmelsmeridiane.

5. Die jährliche Drehung oder Revolution der Erde um die Sonne (Aristarch 279 v. Chr., Copernicus 1543). Die Erde dreht sich jährlich einmal um die Sonne, von Westen nach Osten; die Bahn ist eine ebene, sehr kreisähnliche Ellipse, deren Excentricität = 0,017, d. i. der Abstand des Brennpunktes vom Mittelpunkte der Bahn beträgt 0,017 der halben großen Achse. Die Bewegung der Erde in dieser Bahn ist nicht gleichförmig, sondern gehorcht dem zweiten Keppler'schen Gesetze, nach welchem die größte Geschwindigkeit im Perihel, die kleinste im Aphel stattfindet; die mittlere Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn beträgt ca. 4 Meilen. 540

Gründe für die Revolution sind: 1. Allgemeinheit der Bewegung im ganzen Himmelsraume. Alle Himmelskörper bewegen sich, weil sie frei im Weltraume schweben und von anderen Himmelskörpern angezogen werden; so muß auch die frei im Weltraume schwebende Erdkugel sich fortbewegen. 2. Uebergewicht der Sonnenmasse. Die Masse der Sonne ist 340 000 mal so groß als die der Erde; folglich muß die aus der Anziehung der beiden Weltkörper entstehende Bewegung derselben für die Erde sehr viel größer sein als für die Sonne; die Erde müßte in die Sonne stürzen, was nur durch die lebendige Kraft einer fortschreitenden Bewegung verhindert werden kann. Vermöge dieser lebendigen Kraft würde die Erde sich in gerader Linie in den Weltraum fortbewegen, wenn sie nicht durch die Anziehung der Sonne fortwährend von der geraden Linie abgelenkt würde; folglich muß sich die Erde um die Sonne drehen. Aus diesen Gründen müssen überhaupt kleinere Weltkörper sich um den nächsten größeren drehend bewegen. Dies bestätigen 3. die Monde in der Nähe größerer Planeten, des Jupiter und Saturn, welche um dieselben kreisen, und 4. die Planeten, welche in ähnlichen Entfernungen von der Sonne stehen wie die Erde, und sich ebenfalls um die Sonne drehen. 5. Die Planeten folgen dem dritten Keppler'schen Gesetze, die Quadrate ihrer Jahre verhalten sich wie die Cuben ihrer Entfernungen von der Sonne; demselben Gesetze folgt die Erde; daher ist sie auch ein Planet, sie muß auch

um die Sonne gehen, und da alle Planeten eine westöstliche Revolution vollziehen, so muß die Erde auch diese Richtung haben. 6. Die Fixsterne beschreiben sammt und sonders jährlich eine kleine Ellipse, deren große Achse = 40,5″ bei allen beträgt. Da diese ganz gleiche Bewegung unmöglich den so verschiedenen Fixsternen zugeschrieben werden kann, so muß sie von einer Veränderung der Erde gegen dieselbe herrühren, davon, daß die Erde den Lichtstrahlen der Fixsterne in derselben Weise ausweicht, wie sie von den verschiedenen Punkten der kleinen Ellipse auszugehen scheinen, also davon, daß die Erde eine ähnliche Ellipse beschreibt. 7. Ein Hauptgrund für die 2 Bewegungen der Erde liegt aber darin, daß durch dieselben eine große Anzahl von Himmelserscheinungen sich in einfacher, ungekünstelter Weise erklärt, und daß insbesondere die auf Grund dieser Bewegungen gemachten Vorausberechnungen der Himmelserscheinungen ohne Ausnahme immer zu der berechneten Zeit eintreffen. — Nach Gruithuisens Meinung kann Henglers Pendelwage auch zu einem directen Nachweise der Revolution der Erde dienen, da auf der Erdseite, wo die Richtung der Rotations- und der Revolutionsbewegung übereinstimmen, die Centrifugalkraft eine größere sein muß als an anderen Stellen.

541 **Aufg. 795.** Wie groß ist die Weite des Horizontes eines fünffüßigen Beobachters? Aufl.: $5 : r = r : d + 5$, worin d der Dm. der Erde = 1718 M.; hieraus $r^2 = 5 (d + 5) = 5 (1\,718 . 23\,542 + 5)$, also $r = 14\,250'$. — A. 796. Wie groß ist der Horizont in einer Höhe von 500′? Aufl.: 6,13 M. — A. 797. Wie weit sieht man in einer Höhe von 1000′? Aufl.: 8,67 M. — A. 798. Wie weit ist der Horizont in einer Höhe von 25 000′? Aufl.: 43,36 M. — A. 799. Man kann den Horizont auch in einem rechtwinkeligen Dreiecke ausrechnen, dessen Hypotenuse die Summe des Erdradius $d/_2$ und der Höhe h des Beobachtungsortes ist, dessen eine Kathete der Erdradius $d/_2$ und dessen andere Kathete die Tangente ist; man rechnet den Winkel α aus, den der Radius des Beobachtungsortes mit dem Radius des Berührungspunktes einschließt und findet hieraus die Größe des zugehörigen Erdbogens; wie groß ist der Winkel und der Bogen? Aufl.: $\cos \alpha = d/_2 : (d/_2 + h)$; $b = d\pi \alpha : 360$. — A. 800. Wie groß ist der Winkel und der Bogen auf dem Pic von Teneriffa, wenn $h = 11\,500'$ und $d/_2 = 859,43$ M.; Aufl.: $\alpha = 1^0\, 57'\, 40''$, $b = 29^5/_{12}$ M. — A. 801. Glaisher und Coxwell stiegen am 5. Sept. 1852 mit einem Luftballon zu einer Höhe von 37 000′; welchen Bogen hätten sie übersehen sehen können, wenn sie nicht das Bewußtsein verloren hätten? Aufl.: $\alpha = 3^0\, 27'\, 20''$; ganze Weite 104 M. — A. 802. Wie hoch müßte man sich erheben, um Deutschland in seiner größten Ausdehnung (12⁰) übersehen zu können? Aufl.: 4,73 M. — A. 803. Wie hoch, um ganz Europa übersehen zu können? Aufl.: 262,48 M. — A. 804. Der Chimborazo ist 20 400′ = 0,88 M. hoch; in welcher Entfernung von seinem Fuße verschwindet dem Seefahrer die Bergspitze? Aufl.: $\cos \alpha = r : (r + h)$, wo r der Erdradius, oder $\sin {}^1/_2\, \alpha = \sqrt{[h : 2 (r + h)]}$ oder $\tan \alpha = \sqrt{(2 h : r)}$; hieraus $\alpha = 2^0\, 34' = 38,9$ M. — A. 805. Humboldt wirft (Kosmos Bd. 2. S. 413) die Frage auf, wie hoch der Punkt der afrikanischen Küste sein müßte, von dem man den Pic von Teneriffa sehen könne, wenn die Bogenentfernung β der beiden Punkte $= 2^0\, 49'$ betrage? Aufl.: $\tan \alpha = \sqrt{[(2r + h) h] : r}$; dann ist die gesuchte Höhe $x = r : \cos (\beta - \alpha) - r$; hier ist $\alpha = 1^0\, 55'\, 50''$, hieraus $x = 2427'$. —

2. Der Himmel.

542 **1. Beschreibung des Fixsternhimmels.** Außer Sonne, Mond, den wenigen mit blosem Auge sichtbaren Planeten, den selten erscheinenden Kometen und den schnell vorüberschießenden Sternschnuppen besteht die Welt der Gestirne, der Himmel, für die gewöhnliche Anschauung aus der großen Zahl von Fixsternen; sie bilden den Fixsternhimmel. Da die Fixsterne ihre gegenseitige Stellung für das gewöhnliche Sehen selbst in Jahrtausenden nicht merklich ändern, so bilden dieselben mit einander unveränderliche Figuren, in denen die Volksphantasie schon in den ältesten Zeiten Gestalten des ländlichen Lebens, der Natur- und Götterwelt erblickte, und welche demgemäß theils durch den Volksmund, theils durch alte Sternkundige Namen erhielten, die in der Astronomie Aufnahme gefunden haben und das Auffinden der Sterne erleichtern; daher ist die Kenntniß dieser Sternbilder oder Constellationen für das Studium der Himmelskunde zu empfehlen. Außer der Betrachtung der Constellationen gehört zur Beschreibung des Fixsternhimmels die Vergleichung der Größe oder des Glanzes der Fixsterne, die Zahl derselben, die Farbe und der Wechsel von Glanz und Farbe.

a. Die Größe und Zahl der Fixsterne. Die Fixsterne erscheinen für das gewöhnliche Sehen von verschiedener Größe; diese Größe ist aber nur der Ein-

druck eines größeren oder geringeren Glanzes, einer größeren oder geringeren Lichtstärke; denn durch ein Fernrohr erscheinen selbst die größten Fixsterne nur als leuchtende Punkte, und zwar um so schärfer, je besser das Fernrohr ist. Die mit blosem Auge größer erscheinenden Fixsterne sind durch das Fernrohr gesehen nur hellere Punkte. Nach der Lichtstärke theilt man die Sterne, welche mit blosem Auge sichtbar sind, in Sterne erster bis sechster Größe, die nur mit Fernrohren sichtbaren, die sogenannten teleskopischen Sterne, in solche siebenter bis sechszehnter Größe. Früher geschah diese Eintheilung nur nach der Abschätzung des Lichteindruckes. John Herschel (1833—38) benutzte zuerst ein Astrometer; Seidel (1852) suchte den Einfluß auf, welchen die wechselnde Durchsichtigkeit der atmosphärischen Luft zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Höhen auf die Lichtstärke ausübt. Die genauesten Vergleichungen sind mit Zöllners Polarisationsastrometer (1865) zu gewinnen.

Herschels Astrometer bestand im Wesentlichen aus einer kleinen Convexlinse, mittels welcher er ein sternartiges Mondbildchen erzeugte; diesen künstlichen Stern verglich er mit dem Sterne Fomalhaut im südlichen Fisch, indem er sich von seinem künstlichen Sterne so weit entfernte, daß dieser und der natürliche Stern gleich erschienen. Dann suchte er für den zu messenden Stern die Entfernung, in welcher derselbe ebenfalls dem künstlichen Sterne gleich erschien. Die Lichtstärke dieses Sternes verhielt sich dann nach dem Gesetze in (284.2) zu der des Fomalhaut, die man = 1 setzt, wie die Quadrate der Entfernungen. Zöllner erzeugt den künstlichen Stern durch eine Petroleumflamme, welche seitlich von dem nach dem Himmel gerichteten Fernrohre aufgestellt ist; in diesem befindet sich eine Glastafel unter 45° gegen die Achse geneigt, während neben dieser Glastafel in das erste Fernrohr ein zweites einmündet, das auf dem ersten senkrecht steht und nach der Flamme gerichtet ist. Das zweite Fernrohr enthält Linsen und zwei Nicol'sche Prismen, durch welche die Menge der durchgehenden Flammenstrahlen nach Bedürfniß vermindert werden kann. Diese Strahlen werden von der Glastafel in das erste Fernrohr reflectirt und dort zu dem künstlichen Sterne vereinigt, wodurch derselbe direct neben dem durch dieses Fernrohr sichtbaren Himmelsstern geht und so mit diesem verglichen werden kann. Aus der Drehung des einen Nicols wird die Schwächung des künstlichen Sternes erkannt, welche für die Gleichheit mit dem natürlichen erforderlich ist. Engelmann hat 1868 in Indien südliche Sterne mit diesem Astrometer gemessen und so gefunden, daß die Lichtstärke von α Centauri = 2,095, Atair = 1,407, Achernar = 1,340, Antares = 1,221; Herschel fand für den ersten Stern am Cap der guten Hoffnung 3,820, welcher Unterschied wohl von der tiefen Stellung desselben in Indien herrührt. — Die Zahl der Sterne erster bis sechster Größe, d. i. der mit blosem Auge sichtbaren Sterne steigt nicht über 6000; in Berlin sind nach Humboldt nur 4000 Sterne sichtbar. Heis, der ein besonders scharfes Auge besaß, zeichnete in seinen Atlas coelestis novus (1872) viel mehr, nämlich 5421 von Münster aus mit blosem Auge sichtbare Sterne (bis zur 6,7. Größe) ein. Die Zahl der kleineren Größenklassen wird indeß immer größer; so gibt es etwa 20 St. 1. Gr., 65 St. 2. Gr., 190 St. 3. Gr., 425 St. 4. Gr., 1100 St. 5. Gr., 3200 St. 6. Gr., 13 000 St. 7. Gr. u. s. w.; hieraus folgert Struve, daß mit dem 20füßigen Herschel'schen Spiegelteleskop 20 Mill. Sterne sichtbar sind. Littrow (1869) nimmt an, daß die Sterne uns nur wegen ihrer verschiedenen Entfernungen von uns ungleich erscheinen, und daß sie im Durchschnitt gleichweit von einander abstehen; aus der Menge der Sterne 1. Gr., die sich innerhalb einer gewissen gedachten Kugelfläche befinden, läßt sich die Menge der St. 2. Gr., die sich zwischen dieser und einer doppelt so weit entfernten Kugelfläche befinden, ausrechnen; ebenso lassen sich die Sterne 3. bis 7. Gr. auf diese Weise finden; da nun die so berechneten Zahlen mit den gezählten stimmen, so kann man auch die Zahlen der Sterne niederer Größen nach derselben Methode bestimmen. Auf diese Art findet Littrow, daß die Zahl der sichtbaren Sterne 1500 Mill. betrage. Demnach ist jede uns dunkel erscheinende Stelle des Himmels noch mit zahlreichen Sternen besäet; eine wirklich sternenlose Stelle müßte also viel dunkler aussehen, als die blos dunkel erscheinenden Stellen; solch dunklere Flecken aber gibt es am Himmel, die Kohlensäcke genannt werden.

543

b. Farbe und Veränderlichkeit der Sterne. (Fabricius 1596.) Die Farbe der Fixsterne ist verschieden; doch überwiegt Weiß, dann folgen Gelblich und Röthlich. Weiß sind Sirius, Wega, Deneb, Regulus, Spica; gelblich erscheinen Prokyon, Polaris, Pollux; röthlich Arcturus, Beteigeuze, Aldebaran, Antares. Ptolemäus zählt den Sirius unter die röthlichen Sterne; also hat derselbe seine Farbe gewechselt. Der Stern η Argus war bis 1843 gelb, 1850 dunkelroth. Der Stern σ Persei war nach Goldschmidt 1854 rosenroth, 1855 gelb, dann wieder roth, 1856 weiß, dann gelb, dann wieder roth. Noch häufiger sind die Veränderungen in der Lichtstärke, so daß es veränderliche Sterne

gibt, von denen man nach Schönfeld bis 1874 143 kannte, deren größere Zahl indeß nur mit Fernrohren sichtbar ist. Fabricius entdeckte das auffallendste Beispiel, *o* im Wallfisch (Mira ceti), der in einer Periode von 333 T. von 1. bis 12 Gr. schwankt; 4 Monate lang ist er so klein, das er nicht sichtbar ist; dann nimmt er 3 M. lang zu, erreicht sein Maximum der Lichtstärke, daß er 14 Tage lang behält, worauf er 3 Monate abnimmt. Aehnliche unregelmäßige Perioden haben auch die anderen veränderlichen Sterne; die kürzeste Periode hat Algol im Perseus (2 T. 21 St.). In dem Maximum von 2. bis 3. Gr. verharrt er 2 T. 13 St., sinkt dann in 7 St. bis zur 4. Gr., steigt dann etwas und verharrt 1 St. in dieser Größe, um sich dann rasch zum Max. zu erheben. Man erklärt diese Veränderlichkeit theils durch Rotation der Fixsterne, wobei sie uns verschieden leuchtende Seiten zuwenden können, theils durch Umlauf von dunkeln Begleitern um dieselben, welche sie periodisch verdunkeln, theils durch periodische Revolutionen, z. B. glühende Gasausbrüche. — Auch im Laufe längerer Zeiten treten Veränderungen der Lichtstärke auf; so war bei den Alten Castor heller als Pollux, während jetzt dieser jenen überstrahlt, während jetzt dieser jenen überstrahlt. — In letzter Zeit wurde ein Beispiel periodischen Farbenwechsels unter den Fixsternen entdeckt. Schon 1867 hatte H. J. Klein bekannt gemacht, daß der Stern α im großen Bären seine Farbe periodisch zwischen feuerroth und gelb wechsele. Weber in Peckeloh beobachtete (1876) genauer, daß dieser Wechsel genau alle 33 Tage stattfinde, daß innerhalb dieser Periode der Stern für kurze Zeit feuerroth, sonst aber weißgelb sei.

544 c. Neu erschienene und wieder verschwundene Sterne. Tycho de Brahe (1572) bemerkte in der Cassiopeja an einer Stelle, die sonst nur ganz kleine Sterne zeigte, plötzlich einen Stern von mehr als 1. Gr., so hell strahlend, daß er selbst bei Tage gesehen werden konnte; er wechselte Farbe und Glanz und verlosch allmälig nach 17 Mon.; vor 40 Jahren fand Argelander an dieser Stelle keinen Stern, während d'Arrest in neuester Zeit einen Stern 11. bis 12. Gr. dort sah, der noch immer an derselben Stelle steht. Der Tychonische Stern ist demnach wohl ein veränderlicher Stern von sehr großer Periode, der in der Zeit des Minimums außerordentlich schwach und jetzt im Wachsen begriffen ist. Humboldt zählte aus historischen Nachrichten seit 2000 J. 20 neu erschienene und wieder verschwundene Sterne. Großes Aufsehen erregte 1866 der Stern, welcher plötzlich in der nördlichen Krone aufblitzte, nahezu die Helligkeit von Gemma erreichte und dann wieder allmälig verschwand. Nach Julius Schmidt in Athen ist derselbe identisch mit einem Sterne 9. bis 10. Gr., der in Argelanders Katalog verzeichnet ist. Huggins untersuchte den Stern mit einem guten Spectroskop und fand, daß derselbe 2 Spectra hatte, ein Absorptionsspectrum wie die anderen Fixsterne, und ein Streifenspectrum, das die Wasserstofflinien enthielt, woraus deutlich hervorgeht, daß das Aufblitzen des Sternes einer glühenden Wasserstofferuption zuzuschreiben ist (Falbs neuer Stern im Orion 1875.).

545 d. Die Sternbilder oder die Constellationen. Beim Aufsuchen derselben geht man am besten von dem großen Bär aus, weil derselbe leicht erkennbar und in Europa in jeder heiteren Nacht sichtbar ist.

Fig. 276.



a. Sternbilder des nördlichen Himmels. 1. Der große und der kleine Bär und der Bärenführer oder Bootes (Fig. 276). Der große Bär ist leicht aus 7 ziemlich gleichen Sternen 2. und 3. Größe zu erkennen, von denen 4, α, β, γ und δ, ein Paralleltrapez bildend, einen Theil des Körpers und die 3 übrigen, ε, ζ, η, den Schwanz darstellen. Häufig wird die Figur dieser 7 Sterne auch als Siebengestirn und als Wagen bezeichnet, die 4 Sterne als Räder, die 3 als die Deichsel. Kopf und Füße sind durch kleine Sternenpaare angedeutet. Wenn man durch die 2 Hinterradsterne eine gerade Linie zieht gleich dem fünffachen Abstande derselben, so gelangt man zu dem Sterne α, dem Schwanzsterne des kleinen Bären, der 7 kleinere, eine dem Siebengestirne des großen Bären ähnliche, aber kleinere Figur bildende Sterne enthält. Der Schwanzstern α ist der Nordpolarstern (Polaris). Wenn man den Bogen der 3 Schwanzsterne des großen Bären verlängert, etwa um den sechsfachen Abstand der letzten 2 Schwanzsterne, so gelangt man

zu einem Sterne erster Größe, Arcturus oder α des Bootes. Dieser Stern bildet mit 2 dritter Größe ein die Beine bezeichnendes Dreieck; ganz nahe bei dem Schwanze des großen Bären stellt ein 2. Dreieck von 3 St. 3. Gr. den Kopf und die Schultern dar, während der Gürtel durch einen Stern 3. Gr. und mehrere kleinere St. gebildet wird. Diese 3 Bilder verewigen die Sage von Kallisto, der Königin, und Arkas, dem Prinzen von Arkadien, welche von Jupiter in Bären verwandelt und an den Himmel versetzt wurden, sich aber nicht in dem reinen Schooße des Okeanos erfrischen dürfen (Ovid, Metamorphosen, II. 496). Bootes wird für Lykaon, den Großvater des Arkas, gehalten, der seinen Enkel geschlachtet dem Jupiter als Speise vorgesetzt hatte. — Einige kleine Sterne unter dem Schwanze des gr. B. sind mit dem Namen Jagdhunde belegt worden (Hevel 1690); der Stern a am Halsbande des einen heißt nach Flamsteed das Herz Carls II. Jenseits der Jagdhunde, noch etwas weiter vom Bärenschwanze entfernt, ist eine dichte Gruppe sehr kleiner Sterne, welche der alexandrinische Astronom Konon (230 v. Chr.) Haupthaar der Berenike nannte, zu Ehren des aus dem Tempel verschwundenen Haares der Königin von Aegypten, der Gemahlin von Ptolemäus III. Evergetes. Zwischen dem großen und kleinen Bären zieht sich eine gewundene Linie von Sternen mit einem Viereck $\beta\ \gamma\ \xi\ \nu$ beginnend, das aus St. 3 Gr. besteht, von denen der hellste (γ) Etanin heißt. Diese Figur ist der Drache und stellt den von Herkules überwundenen Hüter der hesperischen Aepfel dar.

2. Cepheus und Cassiopeja, Perseus und Andrometa, nebst dem Pegasus verewigen den Sagenkreis von Andromeda und Perseus (Fig. 277). Der Cepheus steht

Fig. 277.



vom großen Bären aus jenseits des kleinen Bären; er tritt auf den Polarstern, 2 St. 3. Gr. bezeichnen Knie und Gürtel, 1 St. 2. Gr. α die Schulter und 3 kl. St. den Kopf. Er ist der Vater der Andromeda; gerade vor ihm sitzt Cassiopeja, die Mutter, in welcher 5 die Figur begrenzende Sterne ein römisches W bilden. Dann folgt nach derselben Richtung hin Perseus mit über dem Haupte geschwungenem Schwerte; die Sterne, welche seine rechte Seite bis zum gebogenen Knie begrenzen, bilden eine Figur wie die links gekrümmte Ziffer 6, 1 St. 2. Gr., α der Algenib, in dieser Seite bildet mit 3 anderen kleineren Sternen den Körper, neben welchem durch einen Stern der linke Arm bezeichnet ist, der das Haupt der Medusa trägt. Dieses enthält den veränderlichen Stern β oder Algol. Zur Linken liegt Andromeda, der eine Fuß stößt an das Schwertende des Perseus, der andere ist durch den Stern γ, Alamak, angegeben, einen Stern 2. Gr., während der Körper von 4 Sternen begrenzt erscheint, von denen β oder Mirach ebenfalls 2. Gr. ist; auch der Kopfstern α oder Sirrah besitzt diese Größe. Dieser bildet mit 3 Sternen des Pegasus α, β und γ (2. Gr.) ein ziemlich regelmäßiges Viereck, der Tisch des Pegasus oder das Trapez genannt. Der Kopf des Pegasus ist durch den Stern ε (Enif) dargestellt. Zur

Seite des Kopfes befindet sich ein Viereck von kleinen Sternen, den Kopf des Füllens, des kleinen Pferdes vorstellend. Der Wallfisch, das Ungeheuer, welchem Andromeda geopfert werden sollte, befindet sich von dieser Gruppe getrennt, am südlichen Sternenhimmel. Auf der rechten Seite des Perseus steht ein Sternbild, der Fuhrmann, in Form eines unregelmäßigen Fünfecks, das von einem St. 1. Gr., der Capella, 2 St. 2. Gr. und 2 St. 3. Gr. gebildet wird, innerhalb dessen 1 St. 2. Gr. steht. Es stellt den Erfinder des Wagens, König Erichthonius von Athen vor; er trägt auf seinem Arme die Ziege der Amalthea, die das Kind Jupiter nährte; die drei kleinen Sterne unter der Capella heißen Zicklein. Auf der rechten Seite der Andromeda steht ein mit bloßem Auge sichtbarer Nebel n. Auf der linken Seite bilden 3 St. den großen Triangel, ein kleines Dreieck. Der sternarme Raum zwischen dem Fuhrmann und dem Nordpol hat Gelegenheit geboten, die Bilder Giraffe, Rennthier, Erntehüter (Messier) anzubringen, sowie der Raum zwischen Pegasus und Cepheus von Bode für das Sternbild Friedrichsehre (Schwert und Lorbeerkranz) benutzt wurde, neben welchem einige kleine Sterne die Eidechse bilden.

3. Der Schwan und die Leier (Fig. 278.). Zwischen Cepheus und Pegasus steht etwas abwärts in der Milchstraße ein ganz regelmäßiges sehr großes Kreuz, gebildet von einem hellen Sterne 2. Gr. Deneb (α), der sich gerade an einer Spaltung der Milchstraße befindet, 3 St. 3. Gr. und 1 St. 4. Gr.; dieses Sternbild heißt der Schwan. Deneb bildet mit anderen kleineren St. den Körper, die Kreuzarme, an die sich kleinere Sterne schließen, die Flügel und der lange Fuß des Kreuzes den Schnabel. Der Schwan stellt den Sänger Orpheus vor. Neben dem Schnabel befindet sich die Leier des Sängers, in welcher 1 St. 1. Gr., Wega genannt, erglänzt. Auf der anderen Seite des Schnabels bilden einige kleine Sterne den Pfeil; zwischen diesem und dem Körper des Schwans ist das Sternbild Fuchs und in der Verlängerung des Schnabels die Gans angebracht. Jenseits des Pfeils steht wieder 1 Stern 1. Gr., Atair im Adler, dessen Kopf von diesem St., 1 St. 3. Gr. und 1 St. 4. Gr., die in gerader Linie stehen, dargestellt ist, während der Schwanz durch eine ähnliche parallele von 3 ganz kleinen Sternen gebildete Linie angegeben wird. Der Schnabel des Adlers berührt den Kopf des Antinous, eine aus lauter kleinen Sternen zusammengesetzte Figur. Jupiter verwandelte sich in einen Adler, um den schönen Jüngling Ganymed zu rauben; diese Mythe soll in den 2 Bildern verewigt sein; erst Tycho de Brahe gab dem letzten Bilde den Namen Antinous. Auf der dem Antinous entgegengesetzten Seite des Adlers befindet sich das niedliche Sternbild des Delphins, der den Arion an das Land trug und dafür von Jupiter in den Himmel aufgenommen wurde.

Fig. 278.

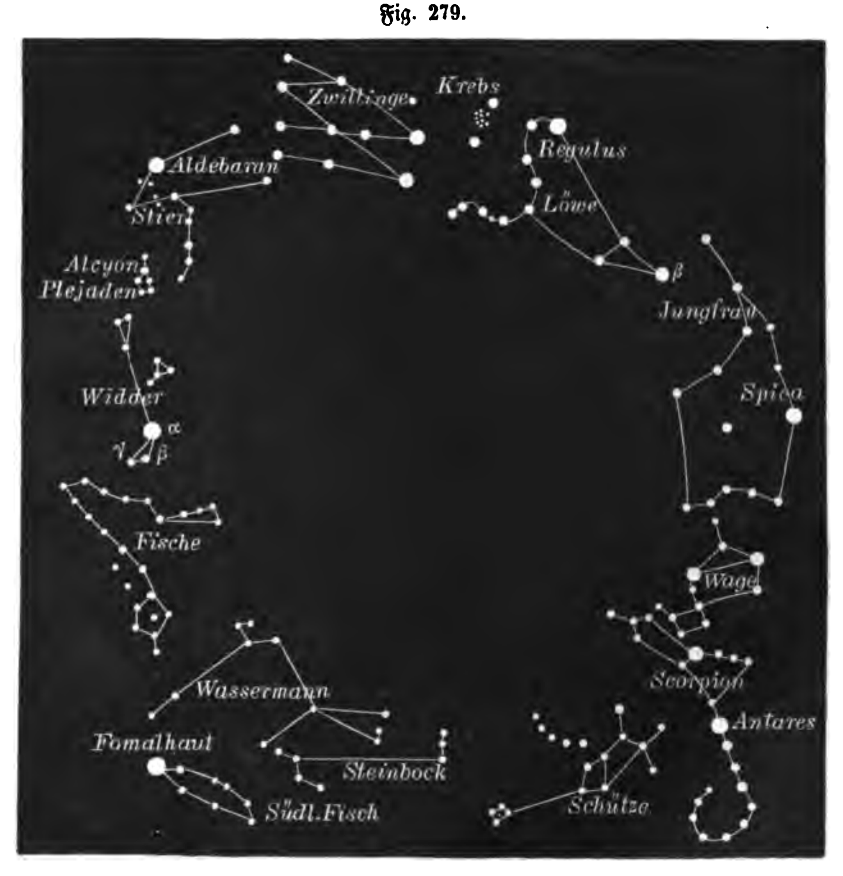


4. Herkules und der Schlangenträger (Fig. 278). Das große Sternbild des Herkules neben dem Schwane und der Leier tritt mit dem linken Fuße auf den hellsten Stern (Etanin) im Drachenkopfe und enthält viele Sterne 3. und 4. Gr., welche die Hauptlinien des Körpers begrenzen. Die Herkulesstirne bezeichnet ein Stern 3. Gr. Ras-Algethi. Der Stern λ im linken Arme gibt die Stelle an, wohin unser Sonnensystem in unserem Jahrhundert seine astrale Bewegung richtet. In der linken Hand trägt Herkules seine Schlangen, die durch ein Sterngewimmel erkennbar sind, in der rechten die geschwungene Keule. Unter dem rechten Arme des Herkules strahlt ein heller Stern 1. Gr., Gemma genannt, der hellste Stern in einem Kreise ganz kleiner Sterne, den man die nördliche Krone nennt, in welcher 1866 ein Stern hell aufblitzte. Neben der Herkulesstirne be-

findet sich der Stern Ras-Alhague, die Stirne einer direct nach entgegengesetzter Richtung gestellten Figur, des Schlangenträgers oder Ophiuchus, der in seinen Händen die Schlange trägt, deren Kopf von der Keule des Herkules bedroht, über der Krone schwebt, und welche sich bis zu dem Adler hinwindet. Der Stern δ heißt Jed oder Schlangenherz, der Stern α Unuk oder Schlangenhals. Nach Aratus ist der Schlangenträger der Arzt Aeskulap, der seine Kunst von einer Schlange erhielt. Nach Ovid gehörte die von Vulkan angefertigte Krone zuerst der Venus und dann der Ariadne, nach deren Tod sie Bacchus an den Himmel versetzte. Der Schlangenträger erstreckt sich weit über den Aeq. hinaus, die Schultern stehen nahezu in demselben, und der linke Fuß tritt auf den Antares, einen Stern 1. Gr. in dem südlichen Sternbilde Skorpion.

b. Sternbilder der Ekliptik. (Fig. 279.) Die Ekliptik ist die Bahn, welche die Sonne scheinbar jährlich am Himmel durchläuft. Dieselbe zieht durch 12 Sternbilder, die 546

Fig. 279.



zusammen den Thierkreis oder Zodiakus bilden, 6 davon liegen nördlich, 6 südlich vom Aequator des Himmels. Die nördlichen sind: Widder, Stier, Zwillinge, Krebs, Löwe, Jungfrau; die südlichen: Wage, Skorpion, Schütze, Steinbock, Wassermann, Fische.

Sunt aries, taurus, gemini, cancer, leo, virgo,
Libraque scorpius, arcitenens, caper, amphora, pisces.

Nach Kloeden (1848) sind die Namen dieser Sternbilder in Aegypten entstanden, indem dieselben mit den durch die Nilüberschwemmung bedingten Erscheinungen und ländlichen Beschäftigungen in Verbindung gebracht wurden. Zu der Zeit, als die erste genauere Kalenderordnung in Aegypten geschah, 1872 v. Chr., ging der Sirius in der Sommermitte kurz vor der Sonne auf, so daß er noch in der Morgendämmerung sichtbar war;

der Tag, an dem dies zum erstenmale stattfand, wurde als der erste Tag des Jahres festgesetzt; das Sternbild, in welchem der Sirius steht, erhielt so als Wächter des Jahres den Namen der große Hund, auf dessen Erscheinen der kleine Hund vorbereitete. Zu jener Zeit nun fiel wegen der Präcession der Fixsterne der Punkt, in welchem die Sonne im Frühlingsanfange stand, fast in den Stier, die Sonne befand sich im Juli im Löwen, bei ihrem Untergange ging das gegenüberliegende Sternbild Steinbock auf. Zu dieser Zeit begann die Nilüberschwemmung, deren Steigen mit dem Steigen des Sternbildes zusammenfiel, dem man deßhalb den Namen eines hoch in die Gebirge steigenden Thieres, des Steinbocks, beilegte. Das Sternbild, das im folgenden Monate aufging, wo die Ueberschwemmung ihre Höhe erreicht hatte, erhielt den Namen Wassermann, und das des nächsten Monats, wo der fallende Nil zahllose Fische auf dem Lande zurückließ, den Namen Fische. Auf dem morastigen Boden wuchsen üppige Kräuter, die abzuweiden die Heerden hinausgetrieben wurden; das Sternbild, das zu dieser Zeit Abends aufging, erhielt so den Namen Widder, und das des folgenden Monates, wo der fester getretene Boden mit Stieren gepflügt wurde, den Namen dieses Thieres. In dem dann beginnenden Monate, wo Alles grünte und blühte, geschahen die Heirathen; das aufgehende Sternbild sah man für ein Brautpaar an, dessen Abbildung von den es nicht verstehenden Griechen als ein Bild von Zwillingen aufgefaßt wurde. In dem nächsten Monate, unserem Januar, kehrte die Sonne von ihrer südlichen Stellung wieder um; dieses wichtige Ereigniß brachten die Aegypter mit dem heiligen Sonnenkäfer in Verbindung und setzten sein Bild über die neu aufgehende Sternengruppe; die Griechen hielten das Bild für einen Taschenkrebs. Die immer wachsende Sonnenkraft, die gelbe Farbe des trocknenden Landes gaben dem folgenden Sternbilde den Namen Löwe, und die in dem nächsten Monate stattfindende Aernte erzeugte das Bild Jungfrau mit der Aehre (spica). Die dann eintretende Tag- und Nachtgleiche wurde durch die Wage bezeichnet, die böse Zeit der größten Hitze im Mai mit dem Skorpion und die rasch dahineilenden Regenwolken des Juni durch das Bild des Schützen dargestellt.

1. Der **Widder** steht in der Richtung vom Nordpole über die Cassiopeja, Andromeda und das Dreieck hinaus; ganz in der Nähe dieses Dreiecks steht ein ähnliches stumpfwinkeliges Dreieck, gebildet von 1 St. 2. Gr. α (Elnath), 1 St. 3. Gr. β und 1 St. 4. Gr. γ oder **Mesarthim**, bei welchem vor 2200 J. die Sonne im Frühlingsanfange stand. Diese Sterne bezeichnen den Kopf des Widders; der Schwanz ist durch 4 kleine Sterne dargestellt. Zwischen Widder und Medusenhaupt ist das kleine Sternbild **Fliege**. Die Griechen sahen in jenem Sternbilde den Widder mit goldenem Vließ, der Phrixus und Helle nach Kolchis trug und zu dem Argonautenzuge Veranlassung ward. 2. Der **Stier** ist leicht an einer Figur kenntlich, die wie ein geöffneter Zirkel aussieht und 1 St. 1. Gr., den röthlichen **Aldebaran**, enthält und den Stierkopf darstellt. Zwei gleiche in der Richtung der zwei Zirkeläste liegende St. 3. G. werden als die Hornspitzen des Stieres betrachtet. Am Hals hat er einen weißen Fleck, das Siebengestirn, die Glucke oder die Plejaden genannt, das 1 St. 2. Gr., die Alkyone, enthält, in deren Nähe sich nach Mädler der Schwerpunkt unseres Astralsystems befindet. 3. Die **Zwillinge**; 2 St. 2. Gr., Castor und Pollux bilden die Köpfe, eine Reihe kleiner St. Schultern und Arme, 3 ziemlich gleiche St. begrenzen den Rumpf und 4 ungleiche St. die Füße. Die Zwillinge stellten bei den Griechen die Dioskuren Castor und Pollux vor. 4. Der **Krebs** ist die Benennung eines ziemlich sternarmen Raumes zwischen Zwillingen und Löwe; ein Sternhaufen in der Mitte desselben heißt auch Krippe und die Sterne zu beiden Seiten desselben das nördliche und südliche Eselchen. Der Krebs steht dem Herkules gegenüber; denn er stellt das krebsartige Ungeheuer vor, das Juno dem Heroen nachsandte. Der sternarme Raum zwischen Krebs und Giraffe ist theils Luchs, theils Herschels Teleskop genannt worden. 5. Der **Löwe** ist an einer geschwungenen, aus großen und kleinen Sternen zusammengesetzten Linie, die Form eines römischen S nachahmend, leicht erkennbar; der Stern am Ende dieser Linie wird von Manchen zur ersten Gr. gerechnet und heißt Regulus (Löwenherz); am Schwanze bilden 3 St. ein rechtwinkeliges Dreieck; der Schwanzstern β von 2. Gr. heißt Denebola. Die Sage von Herkules und dem Nemäischen Löwen. Zwischen dem Löwen und dem gr. Bären ist ein kleines Sternbild von ähnlicher Form, das **kleiner Löwe** genannt wurde. 6. Die **Jungfrau**. Gleich neben dem Dreieck des Löwen bilden 5 St. 3. Gr. ein römisches V (Virgo) mit sehr stumpfem Winkel, welche die oberen Gewandfalten der Jungfrau begrenzen. In der linken Hand trägt sie eine Aehre, durch den St. 1. Gr. Spica fixirt, mit einem Palmzweige in der rechten Hand berührt sie das Haupthaar der Berenike. Eine gewundene Reihe kleiner Sterne bildet den unteren Saum des Gewandes. Die Deutung des Sternbildes ist sehr verschieden; Viele halten es für eine Darstellung der Ceres. 7. Die **Wage**. Zwei kleine Sterne bilden den Wagenhalter, 2 St. 2. Gr., Zubenelgenubi und Zubenelschemali die Wagschale und Gewichtschale; an

dem ersteren hängt noch ein Lastbündel von kleinen Sternen. Zwei sehr kl. St. unter den genannten bilden mit denselben ein Quadrat. Dies Sternbild wurde erst zu Augustus Zeiten als Sinnbild der Gerechtigkeit dieses Kaisers aus Sternen des Skorpions gebildet. 8. Der Skorpion ist ein prächtiges Sternbild, das im äußersten Süden im Sommer für uns sichtbar ist mit Ausnahme des, einen ziemlich regelmäßigen Kreis bildenden Schwanzes, der für uns nie aufgeht. Der Unterkörper ist von einer geraden Linie angedeutet, die 1 St. 1. Gr., den Antares, 1 St. 3. und 1 St. 4. Gr. enthält, der Oberkörper von einem stumpfen Winkel, an dessen Scheitel 1 St. 2. Gr. steht; eine Scheere erstreckt sich bis zum Schlangenherz. Der Skorpion wurde nach Eratosthenes von Zeus an den Himmel versetzt, um ihn zu belohnen für seine Tapferkeit im Kampfe gegen den Orion, der zur ferneren Vermeidung des Streites um 180° von dem Skorpion entfernt wurde. 9. Der Schütze enthält nur kleine Sterne; in der Nähe des Skorpions stehen 4 St. 3. und 4. Gr., die Pfeil, Bogen und Kopf des Schützen bezeichnen; ein Viereck hinter demselben deutet den Körper, ein noch entfernteres den Pferdefuß an, da das Bild den Centauren Chiron vorstellen soll; ein Sternbogen scheidet ihn als Schild von dem Ophiuchus. 10. Der Steinbock hat zum Kopfe 3 St. 3. Gr., zum Schwanze 4 St. 3. und 4. Gr., welche einen vom Kopfe weit entfernten Doppelwinkel bilden. Ueber dem Steinbock steht Antinous und neben diesem über dem Schützen der Schild des Sobieski, der über sich den Stier des Poniatowski hat. 11. Der Wassermann enthält ebenfalls nur kl. St.; 3 St. 3. Gr. bilden Kopf und Schulter, 2 kl. St. an der rechten Schulter die Amphora, mehrere an der linken Schulter das Ende des Tragbandes. Der Wasserguß endigt am südlichen Fisch, dessen Maul durch den Fomalhaut, das Urbild der Sterne 1. Gr., angegeben ist. Der Wassermann stellt nach Manchen den Deukalion vor. 12. Die Fische; 2 fischähnliche Figuren, von denen die eine nach dem Wassermann zu liegt, die andere die Andromeda in die Seite beißt, sind durch ein Sternband verbunden. Nach Hygin hat Venus sich mit ihrem Sohne Cupido aus Furcht vor dem Riesen Typhon in Fische verwandelt, die dann an den Himmel versetzt wurden.

547 c. Südliche, bei uns sichtbare Sternbilder. 1. Die Jagd des Orion (Fig. 280). Das schönste Sternbild des ganzen Himmels ist der Orion, südlich von den Zwillingen und dem Stier stehend; 3 kl. St. bezeichnen den Kopf, 1 St. 1. Gr., Beteigeuze, die

Fig. 280.



rechte Schulter, 1 St. 2. Gr. Bellatrix die linke, 3 in gerader Linie stehende St. 2. Gr. bilden den Gürtel des Orion oder den Jakobsstab, ein St. 1. Gr., Rigel, den linken Fuß, 2 St. 4. Gr. das Schwert. In der rechten Hand schwingt er die Keule gegen den Stier, den linken Arm, schildartig mit einem Felle bedeckt, bezeichnet ein Sternbogen. Ueber ihm droht der Stier, zur Rechten dringt das Einhorn heran, zu dessen Seite der große und der kleine Hund sich gegen den Jäger wenden. Der große Hund hat in seinem Kopfe 1 St. 1. Gr., den Sirius, den schönsten Fixstern des Himmels, und 3 kleinere Sterne; der Körper und eine Vorderpfote sind durch Sterne 2. und 3. Gr. angedeutet; auch der kleine Hund enthält 1 St. 1. Gr., den Prokyon, und 1 St. 4. Gr. Unter dem Orion bilden kleine St. den Hasen und die Taube, und links schwimmt in dem Eridanusfluß, den eine gewundene Sternenlinie bildet, der Wallfisch herbei, der zu dem Sagenkreise des

Perseus gehört. Nach Aratus war Orion ein Jäger, der sich vermaß, um die Göttin Diana zu werben und dafür durch einen von derselben gesandten Skorpion getödtet wurde. Zeus versetzte beide an den Himmel, den Orion mit 1 Hasen und 2 Hunden um einen Halbkreis vom Skorpion entfernt. Der Stier soll nach einigen alten Astronomen die Gestalt darstellen, die Zeus beim Raube der Europa annahm. Die Plejaden waren die 7 Töchter des Atlas und der Plejone; die älteste hieß Alkyone, die jüngste, Apollos Mutter, Maja. Hygin sagt, es wären nur 6 an den Himmel gekommen, weil eine, Merope, einen Sterblichen, den Sisyphus, geheirathet habe. Der Stierkopf heißt auch die Hyaden oder die Regensterne, weil diese zur Regenzeit wieder erscheinen. — Neben dem kleinen Hunde bilden unter dem Krebs 4 kl. St. den Kopf der Wasserschlange, welche sich bis zum Skorpion hinwindet, einen Stern 2. Gr. Alphard (Hyderherz) enthält und im Frühling ganz sichtbar ist; zwischen derselben und der Jungfrau stehen der Rabe, ein schönes Viereck aus 4 St. 3. Gr. gebildet, und der Becher. Sie stellen eine Sage dar, die Ovid erzählt (**Anguis, avis, crater, sidera juncta micant**).

548 d. Südliche unsichtbare Sternbilder. Der Centaur mit dem südlichen Kreuze steht unter dem Schwanze der Wasserschlange; der erste enthält 6 St. 3. Gr. und 1 St. 1. Gr., α Centauri nahe am Südpole, welcher dadurch von besonderem Interesse erscheint, daß er der nächste der bis jetzt berechneten Fixsterne ist. Nahe bei demselben ist das südliche Kreuz, aus 2 St. 2. Gr., einem 3. Gr. und 1 St. 1. Gr. gebildet, die ganz regelmäßig die gewöhnliche stehende Kreuzform nachbilden. Zur Zeit des Ptolemäus erhob sich der letzte, der Fußstern, in Alexandria noch 6° über den Horizont, während er jetzt dort nicht mehr aufgeht. Ganz in der Nähe des Kreuzes sind Stellen am Himmel, die viel dunkler sind als die übrigen sternenleeren Räume, Stellen, durch welche man nach Herschel aus unserem Astralsysteme in den unendlichen Weltraum hinaussieht; dieselben haben den unschönen Namen Kohlensäcke erhalten. Neben dem Kreuze steht das herrliche Sternbild des Schiffes Argo, dessen hellster Stern, Canopus, dem Sirius an Glanz gleich kommt. Nicht weit von demselben nach dem Südpole zu stehen die große und die kleine Magelhaen'sche Wolke, zwei milchstraßenartige Lichtwolken, die aus zahlreichen kleinen Sternen, Sternenhaufen und Nebelflecken bestehen. Bis zur kleinen Wolke nahezu zieht sich der Eridanusfluß, mit einem St. 1. Gr., Achernar, endigend. Die sternarmen Stellen des südlichen Himmels sind zur Verewigung von astronomischen, physikalischen und chemischen Apparaten benutzt worden; so gibt es dort einen chemischen Ofen, eine Elektrisirmaschine, ein Fernrohr, einen Sextant u. s. w., die wir alle füglich übergehen.

549 **2. Scheinbare Bewegungen der Fixsterne.** a. Die tägliche scheinbare Bewegung des Himmels. Alle Gestirne steigen täglich im Osten herauf, erreichen einen höchsten Punkt am Himmel (obere Culmination), steigen im Westen wieder herab und erreichen einen tiefsten Punkt (untere Culmination), um im Osten wieder herauf zu steigen. Diese tägliche Drehung aller Gestirne von Osten nach Westen ist keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht durch die tägliche Rotation der Erde von Westen nach Osten. Wir können nämlich diese Rotation nicht wahrnehmen, weil wir überhaupt eine eigene Fortbewegung nur dann empfinden, wenn Stöße oder Erschütterungen mit derselben verbunden sind, oder wenn wir die nahen Gegenstände an uns vorbeigehen sehen; mit der Rotation der Erde aber sind keine Stöße und Erschütterungen verbunden, und alle Körper um uns nehmen an dieser Rotation Theil; daher ist die Rotation der Erde und von uns selbst um die Erdachse für unsere Empfindung nicht vorhanden. Wenn man sich aber bewegt und von dieser Bewegung nichts empfindet, so scheint sich Alles außer uns in entgegengesetzter Richtung zu bewegen. So scheint sich der ganze Himmel von Osten nach Westen um die Erde zu drehen, weil sich die Erde von Westen nach Osten um sich selbst dreht. Und zwar muß sich jeder Punkt des Himmels so nach Westen zu bewegen scheinen, wie der Erdpunkt, dessen Zenith er ist, sich wirklich nach Osten zu bewegt. Demnach müssen die Himmelspunkte über dem Nord- und Südpole der Erde, der Nordpol und der Südpol des Himmels, bei der täglichen Drehung des Himmels ausschließlich in Ruhe bleiben; ganz in der Nähe des Nordpoles des Himmels steht der Schwanzstern des kleinen Bären; dieser Stern heißt der Nordpolarstern, steht sehr nahe immer an derselben Stelle, und zwar genau nach Norden zu, so daß man an ihm die sicherste Orientirung

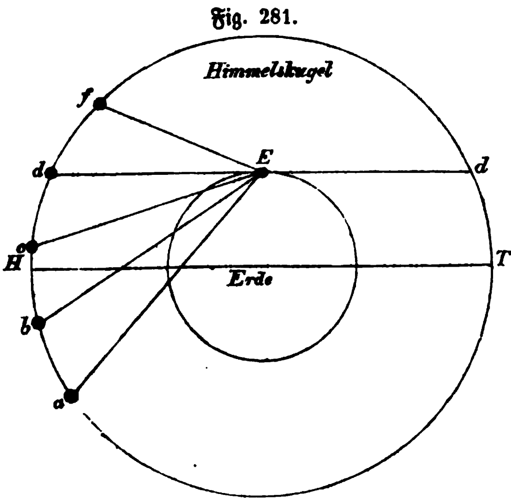
für die Weltgegenden besitzt. Wie nun die Erdpunkte in der Nähe der beiden Pole täglich kleine Kreise fast um den Erdpol beschreiben, so beschreiben auch die Sterne in der Nähe der Himmelspole ganz kleine Kreise um den betreffenden Himmelspol; die Sterne des kleinen Bären laufen täglich in kleinen Kreisen um den Nordpolarstern und gehen daher für uns nie unter. Sterne, welche diese Eigenschaft haben, werden Circumpolarsterne genannt. Wie die Parallelkreise an Größe zunehmen, je weiter die Erdpunkte von den Polen abstehen, so beschreiben auch die Gestirne täglich um so größere Kreise, je weiter sie von den Himmelspolen entfernt sind, und den größten Kreis, den Himmelsäquator, legen diejenigen Sterne täglich zurück, die gleich weit von beiden Polen abstehen. Die täglichen Kreise aller Gestirne sind dem Himmelsäquator sämmtlich parallel, wie die unter ihnen befindlichen Erdorte täglich parallele Kreise mit dem Erdäquator beschreiben.

Man kann sich am einfachsten eine Vorstellung von der Uebereinstimmung der Himmelskreise mit den unter ihnen befindlichen Erdkreisen verschaffen, wenn man sich in einem großen Saale ein Jahrmarktscaroussel denkt, also eine aufrechte Welle als Achse, an der in größeren und kleineren Entfernungen Sitze angebracht sind, während sich oben an der Decke in gleichen Entfernungen schwarze Punkte befinden. Denkt man sich nun in einen solchen Sitz, die Augen senkrecht nach oben an die Decke gerichtet, und die Bewegung so sanft, daß man von derselben nichts fühlt, so scheinen die Punkte in entgegengesetzter Richtung zu kreisen, und zwar scheinen sie genau eben so große Kreise zu beschreiben wie die Sitze, über denen sie angebracht sind. Der Endpunkt der Welle, der Pol, ist in Ruhe, die Punkte in der Nähe desselben beschreiben kleine Kreise, und die Kreise wachsen mit der Entfernung von dem Pole, sind aber immer den Kreisen derjenigen Sitze gleich, deren Zenithe sie sind. So ist auch der Himmelspol in Ruhe, jeder Himmelspunkt beschreibt täglich einen Kreis wie derjenige Erdpunkt, dessen Zenith er ist, alle diese Himmelskreise sind einander parallel, nehmen mit dem Abstande von einem Pole zu, und die Sterne über dem Erdäquator beschreiben den Himmelsäquator. Sterne, die $23^1/_2{}^0$ von diesem entfernt sind, wie z. B. die Sterne des Sternbildes Krebs, legen einen Tageskreis zurück, der Wendekreis des Krebses genannt wird und sich über dem irdischen Wendekreise des Krebses befindet, woraus dessen Name erhellt. Ebenso befindet sich der Wendekreis des Steinbocks auf der Erde unter einem Himmelsparallel, den das Sternbild Steinbock, $23^1/_2{}^0$ südlich vom Himmelsäquator, täglich zurücklegt.

Erscheinungen der täglichen Bewegung an verschiedenen Stellen der Erde. 550

Da der Nord= und Südpol des Himmels sich über dem Nord= und Südpole der Erde befinden, d. h. in der Richtung vom Erdmittelpunkte nach den beiden Erdpolen, so bilden sie auch die Endpunkte der bis an die Himmelskugel verlängerten Erdachse, der sogenannten Weltachse; ebenso ist der Himmelsäquator die Erweiterung des Erdäquators bis an die Himmelskugel; der Himmelsäq. ist danach ein größter Kreis der Himmelskugel. Von den Himmelspunkten sind an einem Erdpunkte E diejenigen a, b, c (Fig. 281) unsichtbar, deren

Fig. 281.



Verbindungslinien aE, bE, cE mit dem Erdpunkte durch die Erde gehen; von unten herauf steigend, werden zuerst diejenigen Punkte d sichtbar, deren Verbindungslinien dE mit dem Erdpunkte an die Erdkugel in diesem Punkte tangiren, welche also eine in

diesem Punkte berührende Ebene dd bilden; was unter dieser tangentialen Ebene am Himmel liegt, ist unsichtbar, was über derselben sich befindet, wie z. B. f, ist sichtbar. Man nennt diese Ebene dd den natürlichen Horizont; ursprünglich bedeutet Horizont den von irgend einem Auge überblickten Theil der Erdoberfläche; denkt man sich das Auge in dieser Oberfläche, so kann es von der Erde gar nichts, vom Himmel nur die über den tangentialen Strahlen liegenden Räume sehen; die tangentiale Ebene dd bildet also eigentlich nur den Himmelshorizont. Eine parallele zu ihr durch das Erdcentrum gelegte und bis an den Himmel erweiterte Ebene HT heißt der astronomische Horizont. Für die Betrachtung der Fixsternwelt ist die Erde verschwindend klein, fällt also der astr. Hor. mit dem natürlichen zusammen; der Hor. ist folglich ebenfalls ein größter Kreis der Himmelskugel; da zwei größte Kreise einander halbiren, so ist der Aeq. halb über, halb unter dem Hor.; der Aeq. ist auf allen Erdpunkten zur Hälfte sichtbar, mit Ausnahme der beiden Erdpole; denn für diese fällt der Hor. in den Aeq., wodurch demnach der ganze Aeq. im Hor. sichtbar ist.

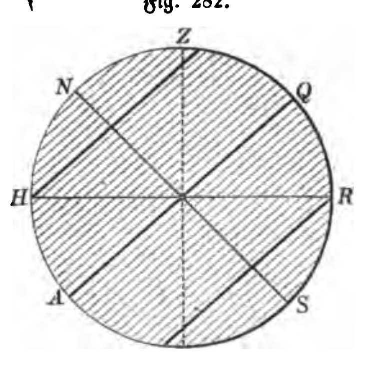
Ein Nordpolbewohner hat über sich, in seinem Zenith, den Nordpol des Himmels, in seinem Nadir den Südpol des Himmels, woraus sich abermals ergibt, daß der Mittelkreis zwischen beiden Polen, der Aeq., in den Horizont fällt. Die Sterne des Himmelsäq. gehen also für den Polbewohner immer im Kreise am Erdrande herum, gehen niemals weder auf noch unter; da alle Sterne nördlich vom Aeq. immer, jahraus, jahrein, denselben Kreis, parallel zum Aeq. beschreiben, so gehen alle nördlich vom Aeq. gelegenen Sterne für den Polarbewohner niemals unter, laufen jeden Tag parallel mit dem Hor. um den ganzen Himmel herum, immer in gleicher Höhe bleibend. Die Sterne südlich vom Aeq. beschreiben auch immer dieselben Parallelkreise südlich vom Aeq., gehen also für den Nordpolbewohner niemals auf, die ganze südliche Himmelshälfte bleibt für denselben unsichtbar. Die umgekehrte Erscheinung hat der Südpolbewohner.

Für den Aequatorbewohner geht durch das Zenith und das Nadir der Himmelsäq., der als ostwestlicher Kreis demnach von Osten senkrecht bis zum Zenith herauf und dann im Westen bis zum Nadir herabsteigt; da jeder Pol nach jeder Richtung um einen Viertelkreis, um 90° vom Aeq. entfernt ist, so liegt für den Aequatorbewohner der Nordpol im Hor. genau nach Norden, der Südpol im Hor. genau nach Süden. Der Aequatorbewohner kann also beide Himmelspole sehen. Weil der Himmelsäq. vom Hor. halbirt wird, so ist derselbe für den Aequatorbewohner wie für jeden Erdbewohner nur zur Hälfte sichtbar; die Sterne des Himmelsäq., wie etwa z. B. der Jakobsstab, sind demnach 12 Stunden sichtbar und 12 St. unsichtbar. Alle anderen Sterne beschreiben täglich zum Aeq. parallele Kreise; da dieser auf dem Hor. senkrecht steht, so stehen auch alle diese parallelen Kreise auf dem Hor. senkrecht, werden also von diesem halbirt; demnach sind auch alle anderen Sterne des ganzen Himmels für den Aequatorbewohner 12 St. sichtbar und 12 St. unsichtbar. Kein Kreis, selbst nicht die kleinen an den Polen, liegt unter dem Hor., jeder liegt halb über demselben; kein Stern ist für den Aequatorbewohner dauernd unsichtbar.

Für jeden anderen Erdbewohner liegt der Pol so viele Himmelsgrade über dem Hor., als die geogr. Br. Erdgrade enthält; denn so viele Erdgrade man sich vom Aeq. nach einem Erdpole hin entfernt, um ebenso viele Himmelsgrade hebt sich der Himmelspol aus dem Hor. heraus: die Polhöhe ist gleich der geogr. Br., ein Satz, dessen strengerer Beweis baldigst folgen wird; für unsere Gegenden liegt also der Nordpol 50° vom Horizont entfernt, ungefähr in halber Himmelshöhe. Der Himmelsäq. zieht für uns, 90° nach Süden vom Pole entfernt, als schiefer Kreis von Osten bis zu 40° Höhe nach Westen und wird vom Hor. halbirt; vom südlichen Himmel sehen wir demnach 40°, die übrigen 50° liegen ganz unter dem Hor., werden also nie für uns sichtbar, während die Nordhälfte des Himmels ganz für uns sichtbar bleibt. Die Kreise der Sterne in der Nähe des Nordpoles liegen ganz über dem Hor., ebenso die Kreise aller Sterne, die weniger als 50° vom Polarsterne entfernt sind, weil dieser selbst 50° vom Hor. absteht: diese sind also jahraus, jahrein immer über dem Hor., sie gehen nie für uns unter; es sind dies die Circumpolarsterne. Die 50° entfernten Sterne berühren bei ihrer unteren Culmination den Hor., verschwinden also für einen Augenblick; noch weiter entfernte Sterne, also solche, welche 30, 20, 10° vom Aeq. abstehen, treten für immer längere Zeit unter den Hor., je näher sie dem Aeq. kommen; sie sind mehr als 12 St. sichtbar, und zwar um so näher 24 St., je weiter sie vom Aeq. entfernt sind; die Sterne des Aeq. selbst sind 12 St. sichtbar und 12 St. unsichtbar. Die Sterne südlich vom Aeq. sind länger unter als über dem Hor.,

sind also mehr als 12 St. unsichtbar, weniger als 12 St. sichtbar, und zwar um so weniger sichtbar, je weiter sie südlich liegen; die von 40° Abstand vom Aeq. blicken nur eben über den Hor., um dann sogleich wieder zu verschwinden; denn der Südpol liegt ebenso viel unter, als der Nordpol über dem Hor., also 50°; demnach kommen alle Sterne innerhalb eines Abstandes von 50° vom Südpole nie über unseren Hor. herauf, sie bleiben immer für uns unsichtbar. Alle diese Verhältnisse werden durch einen Blick auf Fig. 282 klarer; in dieser sind die Tageskreise als gerade Linien dargestellt, wie ja die Kreise erscheinen, wenn sich das Auge in ihrer Ebene befindet; der Kreis bedeutet die Himmelskugel, HR unseren Hor., Z unser Zenith, N und S den Nord- und Südpol, AQ den Aeq. und die zu AQ parallelen Linien die von den einzelnen Sternen beschriebenen Tageskreise; man sieht hieraus, daß die Sterne zwischen H und N, also alle innerhalb eines Abstandes von 50° vom Nordpole gelegenen Sterne nie unter den Hor. treten, daß die zwischen H und A befindlichen, also weniger als 40° nördlich vom Aeq. entfernten Sterne den größeren Theil ihres Kreises über dem Hor. haben, und daß dieser Theil um so größer ist, je weiter nördlich ein Stern liegt; weiter, daß die Aequatorsterne die Hälfte ihres Tageskreises über, die andere unter dem Hor. haben; daß die Tageskreise der Sterne zwischen Q und R (südlich vom Aeq., aber weniger als 40° von demselben entfernt), zwar noch theilweise über dem Hor. liegen, aber mit weniger als ihrer Hälfte, daß also diese Sterne weniger als 12 St. sichtbar sind; und endlich, daß die mehr als 40° südlich vom Aeq. abstehenden Sterne nie für uns aufgehen, da ihre Tageskreise ganz unter unserem Hor. liegen. Die Erscheinungen der täglichen Sternbewegung nähern sich um so mehr der äquatorialen Erscheinung, je näher ein Ort dem Aeq. liegt, und um so mehr der polaren Erscheinung, je näher ein Ort dem Pole liegt; es ist eine dem Anfänger zu empfehlende Uebung, die Erscheinungen für verschiedene Erdorte darzustellen.

Fig. 282.



Der Himmelsäq. zieht vom Sternbilde der Fische zwischen Pegasus und Wassermann durch das kleine Pferd zum Adler, schneidet die Schultern des Schlangenträgers und den Schlangenhals und geht dann zur V-Spitze der Jungfrau, dann berührt er den Löwen im Süden, durchzieht das Haupt der Wasserschlange und geht zwischen dem kleinen Hund und dem Einhorn an den Gürtel des Orion, wonach er zwischen dem Stier und dem Eridanus weiter zieht zum Wallfisch, an dessen Ende er die Fische wieder trifft.

Daß die äquatorialen Sterne die Hälfte ihres Weges über dem Hor. durchlaufen, kann ohne Hilfe des stereometrischen Satzes auf folgende Weise eingesehen werden. Der Südpol liegt ebenso weit unter dem Hor. als der Nordpol über demselben; Sterne von einem gewissen Abstande vom Südpole werden nie sichtbar, solche von gleichem Abstande vom Nordpole sind immer sichtbar. Ueber eine gewisse Grenze hinaus werden beiderseits gleichweit entfernte Sterne der Südhälfte für eine gewisse Zeit sichtbar, in der Nordhälfte für gleiche Zeit unsichtbar; wachsen die Abstände in gleichem Maße, so wachsen auch diese Zeiten in gleichem Maße, sind also in der Mitte zwischen beiden Polen, wo sie für einen und denselben Kreis, den Aeq., gelten, auch noch einander gleich und daher gleich der Hälfte der ganzen Umdrehungszeit = 12 St.

b. **Die jährliche scheinbare Bewegung des Himmels.** Nur der Nordpol und der Südpol des Himmels behalten sowohl im Laufe jedes Tages, als auch im Verlaufe eines Jahres ihre Stellung unverändert bei; alle anderen Sterne, also auch alle Sternbilder haben in verschiedenen Zeiten des Jahres zu derselben Tageszeit eine verschiedene Stellung, an demselben Tage und zu derselben Tageszeit erreichen sie aber in verschiedenen Jahren immer wieder dieselbe Stellung; so steht z. B. das Sternbild des großen Bären um 10 Uhr Abends im April in unserem Zenith südlich vom Polarsterne, im Juni westlich von demselben, dagegen zu derselben Zeit im October nördlich vom Polarsterne nahe am Horizont und im Januar östlich von demselben; so gehen die Plejaden im September Abends um 10 Uhr im Osten auf; im December dagegen stehen sie um diese Zeit in ihrer oberen Culmination, etwas 551

südlich vom Zenith; im März gehen sie um diese Zeit im Westen unter. Die Sterne haben also außer ihrer täglichen Drehung um die Erde noch eine jährliche, welche ebenfalls in ostwestlicher Richtung stattfindet. Diese jährliche Bewegung des Fixsternhimmels ist ebenfalls keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht durch den jährlichen Umlauf der Erde um die Sonne und die hierdurch erzeugte scheinbare jährliche Bewegung der Sonne um die Erde.

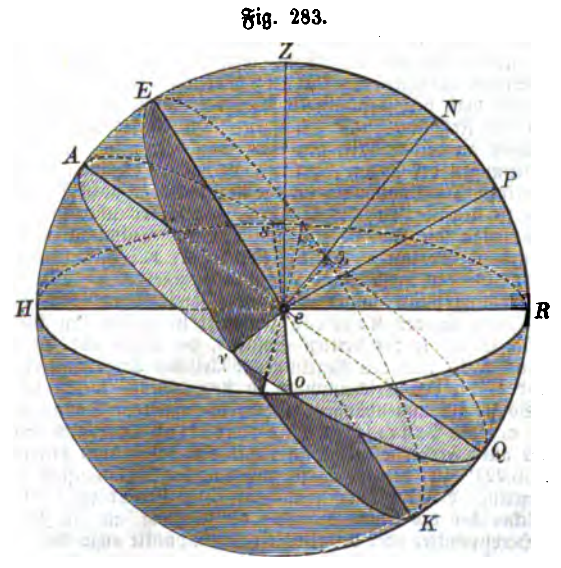
Wir können nämlich die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne nicht wahrnehmen, ebenso wenig und aus denselben Gründen wie die tägliche; die Sonne scheint deßhalb sich jährlich um die Erde zu drehen; diese scheinbare Drehung der Sonne wird aber hierbei nicht die umgekehrte der Erde, wie es bei der täglichen Drehung der Fall ist; denn wenn die Erde sich auf der einen Seite des Himmels z. B. von links nach rechts dreht, so scheint allerdings die für uns an der entgegengesetzten Seite des Himmels stehende Sonne die entgegengesetzte Bewegung von rechts nach links zu machen; setzt aber die Sonne diesen ihren Umlauf fort, bis sie an die Stelle der Erde in der Himmelskugel gelangt, so stimmt nun ihre Bewegung mit der der Erde überein, während die an die Stelle der Sonne gekommene Erde die vorherige Richtung der Sonne hat. Bei einer Kreisbewegung ist überhaupt die Richtung an dem einen Ende eines Durchmessers die entgegengesetzte von der Richtung am anderen Ende desselben; wenn daher 2 Körper an entgegengesetzten Enden die entgegengesetzten Richtungen haben, so besitzen sie dieselbe Kreisbewegungsrichtung. Wie sich also die Erde um die Sonne von Westen nach Osten wirklich dreht, so scheint sich die Sonne um die Erde ebenfalls von Westen nach Osten zu drehen. Die jährliche scheinbare Sonnenbahn nennt man die Ekliptik und den Kreis von Sternbildern, in welchem die Ekliptik liegt, den Thierkreis oder Zodiakus. Wenn also z. B. im October die Sonne im Zeichen der Jungfrau steht, also mit dem Sternbilde auf- und untergeht, wodurch dasselbe auf der ganzen Erde unsichtbar bleibt, so steht die Jungfrau Morgens im östlichen Horizont. Nach 1/4 Jahr hat sich die Sonne um 1/4 des Himmels von dem Sternbilde nach Osten zu entfernt: die Jungfrau steht Morgens in der Mitte zwischen Osten und Westen in ihrer höchsten Stellung, war also von Mitternacht bis Morgens am Osthimmel sichtbar. Nach 1/2 Jahr hat sich die Sonne um die Hälfte des Himmels von dem Sternbilde entfernt: die Jungfrau steht Morgens im westlichen Horizont, war also die ganze Nacht sichtbar. Nach 3/4 Jahren hat die Sonne 3/4 des Himmels nach Osten hin zurückgelegt, ist also von der Jungfrau nach Osten zu 3/4, nach Westen zu 1/4 des Himmels entfernt: die Jungfrau steht Morgens zwischen Westen und Osten in ihrer tiefsten Stellung, war also von Abends bis Mitternacht am Westhimmel sichtbar. Die Jungfrau und so jedes Sternbild scheint sich also jährlich von Osten nach Westen um die Erde zu drehen. Hieraus erklärt es sich, warum der Himmel in der einen Jahreszeit einen anderen Anblick bietet als in der anderen, warum die Sternbilder theilweise 1/2 Jahr unsichtbar sind, sowie warum die Sternbilder, die aus Cirkumpolarsternen bestehen, zu verschiedenen Jahreszeiten eine verschiedene Stellung haben.

552 **Ortsbestimmung der Gestirne.** Um feinere scheinbare und wirkliche Bewegungen der Fixsterne wahrnehmen zu können, muß man zu jeder Zeit genau die Stelle angeben können, wo sich ein Fixstern befindet. Zu diesem Zwecke bedarf man eines festen größten Kreises der Himmelskugel und auf diesem eines festen Punktes; man denkt sich dann durch den Fixstern einen größten Kreis senkrecht zu dem festen Kreise gelegt und mißt dann sowohl den Bogenabstand des Fixsternes von dem Schnittpunkte der zwei Kreise auf dem zweiten Kreise, als auch den Bogenabstand dieses Schnittpunktes von dem festen Punkte auf dem ersten Kreise. Als feste größte Kreise, als Grundkreise sind angewendet worden der Hor., die Ekliptik und der Himmelsäq., so daß es drei Ortsbestimmungssysteme gibt. 1. Das System des Horizontes. Der Grundkreis ist der Hor., der Anfangspunkt der Zählung liegt im Südpunkte, d. i. in dem Punkte, in welchem der Meridian des Ortes den Hor. trifft; die Zählung geschieht nach Westen. Die durch die Sterne gedachten senkrechten Kreise, welche alle durch das Zenith als Pol des Hor. gehen, heißen Höhenkreise. Der Abstand eines Sternes vom Hor., auf dessen Höhenkreis gemessen, wird Höhe, der Abstand des Höhenkreises vom Südpunkte Azimuth genannt. Der Abstand des Poles vom Hor. auf dem Meridian gemessen heißt Polhöhe, der Ab-

stand des Aeq. Aequatorhöhe; die Polhöhe ist gleich der geographischen Breite eines Ortes. 2. Das System der Ekliptik. Der Grundkreis ist die Ekliptik, ein größter Kreis, der gegen den Aeq. um $23^{1}/_{2}{}^{0}$ geneigt ist und denselben in 2 Punkten schneidet, die man Nachtgleichenpunkte oder Frühlingspunkt (♈) und Herbstpunkt (♎) nennt; der Anfangspunkt ist der Frühlingspunkt, die Zählung geschieht nach Osten, die durch die einzelnen Sterne gelegten senkrechten Kreise, welche sämmtlich durch den Pol der Ekliptik gehen, heißen Breitenkreise. Die Entfernung eines Sternes von der Ekliptik auf dessen Breitenkreise gemessen wird Breite, die Entfernung des Breitenkreises vom Frühlingspunkte Länge genannt. 3. Das System des Aequators. Der Grundkreis ist der Aeq., der Anfangspunkt ist der Frühlingspunkt, die Zählung geschieht nach Osten; die durch die einzelnen Sterne gelegten senkrechten Kreise, welche sämmtlich durch die beiden Himmelspole gehen, heißen Declinationskreise. Der Abstand eines Sternes vom Aeq. auf dessen Declinationskreise gemessen, wird Declination (+ D oder — D), die Entfernung des Declinationskreises vom Frühlingspunkte gerade Aufsteigung (Ascensio recta. A. R.) genannt. Die letztere Messungsmethode ist jetzt die gebräuchlichste. Die schiefe Aufsteigung (Ascensio obliqua) ist die Entfernung eines Sternes vom Frühlingspunkte auf einem durch die beiden Punkte gelegten größten Kreise gemessen. Damit die zu messenden Winkel nicht zu groß werden, hat man von einer Reihe wohlbekannter Sterne die A. R. und D. auf das Genaueste bestimmt und benutzt diese für denselben nahe liegende Sterne als Anfangspunkte eines neuen dem Grundsysteme parallelen Systems; diese Sterne heißt man Fundamentalsterne; ihre A. R. und D. müssen zu der neuen A. R. und D. addirt oder subtrahirt werden, um die richtige A. R. und D. eines Sternes zu erhalten.

Das erste System liefert für jeden Erdpunkt andere Ortsbestimmungswerthe eines und desselben Sternes; es ermöglicht aber die einfachsten Methoden. Man muß zuerst das Fernrohr des Theodolithes in den Meridian stellen, so daß es im südlichen Hor. den Südpunkt, im nördlichen den Nordpunkt steht; zu diesem Zwecke richtet man es auf den Polarstern. Da derselbe aber nicht ganz genau im Nordpole steht, so stellt man den Kreuzungspunkt des Fadenkreuzes auf den Stern ein, wenn er am weitesten rechts steht, und wenn er am weitesten links steht, und gibt dann dem Fernrohre genau die mittlere Lage; dann dreht man das Fernrohr um seine wagrechte Achse, bis es in den südlichen Hor. steht, so hat man den Südpunkt. Nun richtet man das Fernrohr auf den zu messenden Stern und dreht es um die wagrechte Achse in den Hor., so gibt seine Drehung die Höhe an; endlich dreht man es um die senkrechte Achse bis in den Südpunkt zurück, so erhält man das Azimuth. In Fig. 283 ist der horizontale Kreis HR der Hor., der verticale HZR der Meridian des Ortes, Z das Zenith, H der Südpunkt, R der Nordpunkt; der Kreis AOQS stellt den Aeq. vor; die Punkte O und S, wo derselbe den Hor. trifft, sind

Fig. 283.



der Ost- und Westpunkt; der Kreis EAKV ist die Ekliptik, die den Aeq. in A und V schneidet, dem Frühlingspunkte und Herbstpunkte; N ist der Nordpol, P der Pol der Ekliptik. NR ist die Polhöhe, NZ die Zenithdistanz des Poles. Da die geogr. Br. eines Ortes, der Abstand eines Ortes vom Erdäq. auch am Himmel an dem Abstande AZ seines Zenithes Z vom Aeq. austritt, und da diese mit der Zenithdistanz ZN zusammen 90° ausmacht, ebenso wie die Polhöhe mit der Zenithdistanz einen Quadranten bildet, so ist die Polhöhe gleich der geogr. Br.; ebenso ist die Aequatorhöhe AH gleich der Zenithdistanz. — Um die Elemente des dritten Systems zu messen, benutzt man das Passage-Instrument, ein auf festem Mauerwerke um eine wagrechte Achse genau im Meridian drehbares Fernrohr mit Fadenkreuz; ob das Fernrohr wirklich im Meridian steht, erfährt man dadurch, daß die Zeit zwischen einer oberen und der darauf folgenden unteren Culmination eines Circumpolarsternes eben so groß ist als die Zeit zwischen dieser und der nächsten oberen Culmination. Ist dies festgestellt, so mißt man die Höhe eines Circumpolarsternes sowohl bei seiner oberen als auch bei seiner unteren Culmination; dadurch erhält man die Polhöhe; denn diese ist gleich dem arithmetischen Mittel der beiden Culminationshöhen. Hieraus ergibt sich die Aequatorhöhe, da dieselbe das Complement der Polhöhe ist. Nun wartet man eine obere Culmination des zu messenden Sternes ab; dann fällt dessen Declinationskreis, sowie sein Höhenkreis in den Meridian; mißt man jetzt die Höhe des Sternes, d. i. seinen Bogenabstand vom Horiz., so hat man nur die Aequatorhöhe von dieser Culminationshöhe abzuzählen, um den Bogenabstand des Sternes vom Aeq., d. i. seine Declination zu erhalten. Für die Rectascension bedarf man eines genauen Chronometers und der Rectascension eines benachbarten Fundamentalsternes. Man beobachtet die Zeit der Culmination des Fundamentalsternes und dann die Zeit der Culmination des zu messenden Sternes; liegen die 2 Sterne auf einem Declinationskreise, so culminiren sie zu gleicher Zeit, haben also auch gleiche Rectascension; steht der zu messende Stern 15° östlicher als der Fundamentalstern, so culminirt er 1 Stunde später, weil die Drehung von 360° in 24 St. vollbracht wird; man hat also nur den Unterschied der 2 Culminationszeiten mit 15 zu multipliciren, um den Unterschied der Rectascensionen zu erhalten; dieser wird zu der A. R. des Fundamentalsternes addirt, so hat man die gesuchte A. R. des Sternes. — Die Rectascension der Fundamentalsterne wird bestimmt, indem man den Unterschied ihrer Culminationszeit und der des Frühlingspunktes mit 15 multiplicirt; hierbei entsteht nur die Schwierigkeit, daß an diesem Punkte kein Stern steht, und daß er wegen der Präcession (150.) sich verändert; durch folgendes Verfahren kann dieselbe umgangen werden: Man mißt an dem Tage vor und nach Frühlingsanfang die Culminationshöhe und die Culminationszeit der Sonne und in den folgenden 2 Nächten die Culminationszeit des zu messenden Fixsternes; die Zwischenzeit zwischen der Culmination des Sternes und der der Sonne wird am zweiten Tage kleiner sein als am ersten, weil die Sonne sich an dem ersten Tage nach Osten zu, dem Sterne entgegen, bewegt hat; wird diese Zeit in St. ausgedrückt mit 15 multiplicirt, so erhält man den westöstlichen Weg der Sonne an diesem Tage. Auf diesem Wege ist sie durch den Frühlingspunkt gegangen. Die Entfernung desselben von den beiden Sonnenstellungen an beiden Mittagen kann man berechnen, indem dieselben sich wie die beiden Entfernungen der Sonne vom Aeq. verhalten, die man leicht finden kann, wenn man von den beiden Culminationshöhen die Aequatorhöhe abzieht. Wird die nach dem Fundamentalsterne zu liegende Entfernung durch 15 dividirt und zu der zweiten Zwischenzeit addirt, so hat man die Zwischenzeit zwischen der Culmination des Frühlingspunktes und des Sternes, welche mit 15 multiplicirt die A. R. ergibt. Gewöhnlich wird indeß die A. R. nicht in Graden, sondern in Stunden angegeben. — Die Declinationskreise, welche durch den Frühlingspunkt und Herbstpunkt, sowie durch den höchsten und tiefsten Punkt des Aeq. gehen, werden Koluren genannt; sie theilen den Himmel in 4 gleiche Quadranten. — Die Elemente des dritten Systems, die Länge und Breite eines Sternes, können aus D. und A. R. nach den Regeln der sphärischen Trigonometrie berechnet werden; sie kommen besonders bei den Erscheinungen in Anwendung, welche mit der Bewegung der Erde um die Sonne zusammenhängen, und welche unserem Sonnensysteme angehören.

553 c. Die Präcession und Nutation (Hipparch 180 v. Chr., Bradley 1748). Die Länge aller Fixsterne bleibt im Laufe der Jahre nicht dieselbe, sondern nimmt jedes Jahr um 50,221″ zu; hieraus folgt, daß auch die Rectascension und Declination der Sterne sich um geringe Beträge ändern müssen. Die Veränderung aller Fixsterne kann auch als ein Zurückweichen des Anfangspunktes der Zählung, als ein Zurückgehen des Frühlingspunktes und Herbstpunktes oder beider Nachtgleichenpunkte angesehen werden. Sie erklärt sich daraus, daß die Sonne den außerkugelförmigen, äquatorialen Wulst der Erde in ihre eigene Ebene, die Ekliptik, zu drehen und dadurch die Erdachse senkrecht zur Ekliptik zu richten strebt. Wenn aber die freie Achse eines Rotationskörpers einer Kraft unterliegt, die ihre Richtung zu ändern strebt, so ändert sie dieselbe nicht, sondern beschreibt eine Kegeldrehung; so ändert

auch die Erdachse ihre Richtung nicht, sondern beschreibt in 26000 Jahren eine ostwestliche Kegeldrehung um die Achse der Ekliptik. Der Nordpol beschreibt um diese Zeit einen Kreis von 23½° Halbmesser um den Pol der Ekliptik, der unter dem Drachenkopfe in der Nähe des Polarsternes liegt; die Ekliptik ändert in Folge dieser Achsenwanderung allmälig ihre Lage; folglich rücken auch ihre Schnittpunkte mit dem Himmelsäquator, und dies sind ja die Nachtgleichenpunkte, allmälig auf der Ekliptik nach Westen hin, wodurch die nach Osten gezählten Längen wachsen. Näheres 150.

554 d. Die Aberrationsellipse der Fixsterne (Bradley 1726). Alle Fixsterne beschreiben in einem Jahre kleine Ellipsen von Westen nach Osten, deren große Achsen 40½ Sec. betragen; in der Nähe des Poles der Ekliptik, der unter dem Drachenkopfe nach dem Polarsterne zu liegt, ist auch die kleine Achse sehr nahe eben so groß; dieselbe wird aber um so kleiner, je weiter die Sterne vom Pole der Ekliptik entfernt sind, und ist für Sterne der Ekliptik selbst gleich Null, so daß diese Sterne nur eine gerade Linie von 40″ Länge jährlich hin- und hergehend beschreiben. Diese Erscheinung ist keine Wirklichkeit, sondern ein Schein, hervorgebracht dadurch, daß die Geschwindigkeit der Erde gegen die des Lichtes nicht verschwindend klein ist; während ein Lichtstrahl durch das Fernrohr geht, bewegt sich die Erde fort; der Lichtstrahl würde auf die Wände des Fernrohres fallen, wenn nicht das Fernrohr eine solche schiefe Richtung erhielte, daß seine Wand während der Fortbewegung der Erde und des Fernrohres dem Lichtstrahle fortwährend ausweichen würde; diese schiefe Richtung muß nach der Seite hin stattfinden, wohin sich die Erde fortbewegt; und da wir einen Stern immer in der Richtung sehen, in welcher sein Strahl unser Auge trifft, so scheint jeder Stern in der Richtung verschoben, in welcher sich die Erde bewegt. Diese Verschiebung, die man die Aberration des Lichtes nennt, ist so groß, daß ihre trigonometrische Tangente gleich der Geschwindigkeit der Erde dividirt durch die des Lichtes, also $= 20{,}2''$; sie ist in dem einen Halbjahre nach der entgegengesetzten Seite gerichtet wie im anderen, und in beiden gleich groß, also im Ganzen $= 40\frac{1}{2}''$. Sie ist indessen nur dann ganz vorhanden, wenn die Erde eine solche Richtung hat, daß sie dem Strahle des Sternes ausweicht, wenn also die Erdrichtung und die Strahlrichtung auf einander senkrecht stehen; dies ist nur für den Pol der Ekliptik nahezu der Fall; dieser gibt daher allein ein genaues Spiegelbild der Erdbewegung in seiner Aberrationsellipse. Steht der Stern in der Ebene der Ekliptik, so bewegt sich die Erde an 2 diametralen Stellen ihrer Bahn in der Richtung des Strahles, hier kann also keine Verschiebung stattfinden; die Erde geht nicht aus der Ebene der Bahn heraus, also kann auch der Stern nicht aus derselben zu gehen scheinen, er muß in der Ekliptik sich hin- und herschieben; die kleine Achse der Aberrationsellipse ist Null. Diesen zwei äußersten Fällen nähert sich ein Stern um so mehr, je näher er am Pole oder an der Ekliptik steht.

555 e. Die jährliche Parallaxe und die Entfernung der Fixsterne (Bessel 1837). Wenn die Bewegung der Erde um die Sonne eine Wahrheit ist, so muß ein Fixstern zu verschiedenen Jahreszeiten an verschiedenen Stellen der Himmelskugel erscheinen, ähnlich wie ein in der Mitte eines Zimmers befindlicher Gegenstand uns an verschiedenen Stellen der gegenüberliegenden Wand erscheint, wenn wir uns vor ihm hin- und herbewegen; und zwar muß, wenn die Erde in ihrem westlichsten Bahnpunkte steht, der Stern uns am weitesten östlich erscheinen, und umgekehrt; den Bogenabstand nun der zwei äußersten Stellungen eines Sternes während eines Jahres nennt man die doppelte jährliche Parallaxe; schärfer definirt ist die Parallaxe der Winkel, unter welchem von dem Sterne aus der Halbmesser der Erdbahn erscheint; sie ist demnach der Winkel an der Spitze eines rechtwinkeligen Dreiecks, dessen eine Kathete der Halbmesser der Erdbahn = 20 Mill. M. ist; folglich kann man mittels der Parallaxe die andere Kathete dieses Dreiecks, d. i. die Entfernung des Sternes bestimmen. Die Parallaxe wird um so kleiner, je weiter der Stern entfernt ist; ist die Entfernung desselben gegen den Halbmesser der Erdbahn unendlich groß, so ist die Parallaxe gleich Null; sie wird nahezu gleich Null, wenn die Entfernung gegen den Halbmesser sehr groß ist. Nun hat man nur mittels besonders künstlicher Methoden und ausgezeichneter Instrumente für mehrere Sterne Parallaxen aufgefunden, welche noch nicht 1″ betragen; hieraus folgt, daß die Fixsterne eine solche Entfernung besitzen, daß selbst der Halbmesser der Erdbahn (20 Mill. M.) gegen dieselbe außerordentlich klein ist; der nächste Fixstern, α Centauri, ist 4,5 Bill. M. oder 3½ Jahre Lichtzeit entfernt.

Die Existenz einer Himmelskugel, welche bei dieser Erklärung vorausgesetzt wird, ist allerdings nur eine Fiction zur Erleichterung der Darstellung; indessen wird durch Fixsterne, welche noch weiter als der zu messende Fixstern entfernt sind, diese Himmelskugel vorgestellt, indem man die jährliche Aenderung der Stellung des Fixsternes gegen seinen Sternhintergrund ins Auge faßt. Dies ist schon deßhalb geboten, weil die parallaktische Ortsveränderung eines Fixsternes viel zu gering ist, um durch ein gewöhnliches Fernrohr als Aenderung der A. R. und D. wahrgenommen werden zu können; sie läßt sich nur wahrnehmen, wenn ganz nahe bei dem Sterne ein zweiter sehr schwacher und demnach unendlich weit entfernter Stern steht, und wenn man ein Instrument hat, durch welches die kleinsten Aenderungen der Distanz und der Position gemessen werden können. Ein solches Instrument besitzt die Astronomie in dem feinsten Mikrometer, dem Heliometer von Fraunhofer. In demselben ist das Objectiv so gespalten, daß 2 Bilder entstehen, welche man mittels Mikrometerschrauben und dadurch veränderter Stellung der beiden Gläser zum Decken, zur Berührung oder auch in beliebige Entfernung von einander bringen kann. So mißt man z. B. den scheinbaren Durchmesser der Sonne oder eines Planeten, indem man die Bilder zuerst zum Decken, und dann zu äußerer Berührung bringt; die Größe der Drehung der Mikrometerschraube gibt ein Urtheil über die Größe der Verschiebung, welche dem scheinbaren Durchmesser gleich ist. Dreht man an der Schraube des anderen Glases, bis eine zweite Deckung und dann eine abermalige Berührung stattfindet, so hat man die gesuchte Distanz multiplicirt, was man noch öfter wiederholen und so auch eine fast unmeßbare Distanz zu einer meßbaren machen und dann durch entsprechende Division genau finden kann. Dieses Heliometer hat Bessel zuerst angewendet, um für den Stern 61 im Schwan sowohl die Distanz von 2 sehr nahen und sehr schwachen Sternen, als auch den Positionswinkel, d. i. den Winkel zu finden, den die Verbindungslinie zweier Sterne mit dem Declinationskreise des einen Sternes macht; diese Bestimmung wurde 400mal wiederholt und hieraus die Parallaxe des Sternes 61 Cygni = 0,511″ gefunden. Seitdem wurden die Parallaxen von etwa 40 St. nach ähnlichen Methoden aufgesucht und daraus die Entfernung berechnet; in folgender Tafel enthält die 2te Colonne die Parallaxe, die dritte die Entf. in Billionen M.

α Centauri . .	0,919″	4,5	Arcturus . . .	0,127″	32
61 Cygni . . .	0,511″	8,1	1830 Groombridge	0,118″	35
Sirius	0,193″	21	Polarstern . . .	0,076″	54
Wega	0,180″	23	Capella	0,046″	90

556 f. Das Auseinandergehen des Herkules und die Eigenbewegung unseres Sonnensystems (W. Herschel 1783, Argelander 1783). Bei den Sternen des Herkules und der in seiner Nähe stehenden Sternbilder zeigten die Untersuchungen von Herschel und die noch gründlicheren Argelanders, daß dieselben sich in einem Jahrhundert etwas von einander entfernt haben, während nach Galloway die Sterne von gegenüber liegenden südlichen Sternbildern mehr zusammen gerückt sind und die zwischenliegenden Sternbilder eine solche gemeinschaftliche Aenderung nicht wahrnehmen lassen. Diese eigenthümliche, offenbar nur scheinbare Bewegung erklärt man dadurch, daß unser Sonnensystem eine eigene Bewegung hat, und daß diese nach dem Sternbilde des Herkules hin, von dem entgegengesetzten Himmelspunkte also weg gerichtet ist; wenn man sich nämlich einer Vielheit von Gegenständen nähert, so rücken dieselben mehr aus einander, während sie bei unserer Entfernung sich mehr einander zu nähern scheinen. Die Stelle, auf die unser Sonnensystem jetzt hingerichtet ist, wird von verschiedenen Forschern, die nach verschiedenen Methoden rechneten, ziemlich übereinstimmend als ein Punkt in der Nähe des Sternes λ Herculis angegeben.

557 **Wirkliche Bewegungen der Fixsterne.** a. Die Eigenbewegung der Fixsterne (Bradley 1755, Mädler 1855). Die Fixsterne haben außer den betrachteten scheinbaren Bewegungen auch eine eigene im Weltraume fortschreitende Bewegung, welche indessen so klein ist, daß sie für das gewöhnliche Sehen selbst in Jahrtausenden noch unmerklich bleibt, mit dem Fernrohre aber schon in einem Jahrhundert als sehr beträchtlich erkannt wird und bis zu 8″ in einem Jahre ansteigt; hiernach ist die Benennung Fixsterne nicht der Wahrheit entsprechend, und es verändert sich der Anblick des gestirnten Himmels, die Gestalt der Sternbilder in Jahrmillionen vollständig.

Der Name Bradleys bleibt, so lange menschliche Wissenschaft besteht, unauflöslich mit der Eigenbewegung der Fixsterne verbunden, weil er zuerst einen Fixsternkatalog anfertigte, der die Oerter von 3222 Sternen enthält; zählt man von diesen Oertern die Veränderungen ab, welche von den scheinbaren Bewegungen herrühren, und vergleicht sie mit den später

bestimmten Oertern, wie es Mädler ein Jahrhundert nach Bradley gethan hat, so erhält man die Ortsveränderung in dieser Zeit. Dieselbe ist sehr ungleich; die hellsten, also für die nächsten gehaltenen Sterne zeigen zwar eine starke Eigenbewegung, z. B. Sirius 125″, Arctur 226″, allein durchaus nicht in dem Maße ihrer größeren Nähe stärker; der kleine Stern ε Indri hat 771″, 61 Cygni (5. Gr.) hat 522″, ein Stern im Eridanus 409″ säculare Eigenbewegung, woraus hervorgeht, daß die Geschw. dieser Bewegung bei den verschiedenen Sternen sehr verschieden ist. Die Zukunft wird diese Bewegung genauer kennen, da jetzt Hunderttausende von Sternörtern bestimmt sind, die eine Grundlage für künftige Vergleichungen bieten. Daß Huggins die Verschiebung der Spectrallinien des Sirius benutzt hat, um eine von uns weg gerichtete Bewegung dieses Sternes zu erkennen, und für dieselbe sogar eine Geschw. von 6 M. berechnet hat, ist schon in 325. besprochen worden; Vogel und Lohse haben auf der neuen Sternwarte zu Bothkamp unter Benutzung von Zöllners Reversionsspectroskop für den Sirius eine Geschwindigkeit von 10 M., für den Prokyon sogar von 14 M. in entgegengesetzter Richtung gefunden; ebenso für Atair 10 M., für Wega 11 M.; Huggins für Arctur 11 M.

558 b. Die Revolution der Doppelsterne (Christian Mayer zu Mannheim, W. Herschel 1778). Bei teleskopischer Untersuchung der dem blosen Auge einfach erscheinenden Sterne hat sich herausgestellt, daß ein Drittel bis ein Viertel derselben aus 2 oder mehreren ganz eng beisammen stehenden Sternen besteht; die Zahl der Doppelsterne ist bei Weitem überwiegend; doch gibt es auch 3fache und 4fache Sterne; σ Orionis ist nach Struve sogar ein 16facher Stern. Das Trapez im Orion, das man früher für 4fach hielt, enthält nach J. Herschel jetzt 6 Sterne, von denen 2 allmälig zur Sichtbarkeit herangewachsen sind. Viele Doppelsterne sind nur optische Doppelsterne, d. h. sie scheinen eng beisammen zu stehen, weil sie nahezu in derselben Gesichtslinie liegen, können aber in der Richtung derselben weit von einander entfernt sein. Die meisten Doppelsterne sind physische Doppelsterne, d. h. sie bilden ein Sternsystem für sich, dessen Theile von einander viel weniger weit als von anderen Sternen entfernt sind; dafür spricht zunächst ihre Anzahl, die zu groß ist, um sie als Resultat des zufälligen Hintereinanderstehens ansehen zu können; dann spricht dafür die oft gemachte Beobachtung, daß die 2 Sterne zusammen dieselbe Eigenbewegung haben, also sich am Himmel fortbewegen, ohne ihre Zusammengehörigkeit zu verlieren; der entschiedenste Beweis liegt aber darin, daß sie sich um einander drehen, und daß die Umdrehungszeit dieselbe bleibt. Gewöhnlich ist der eine viel größer als der andere, und es dreht sich dann der kleinere (der Begleiter) um den größeren (den Hauptstern); oft aber auch drehen sie sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Bei dieser Revolution gehorchen sie den Keppler'schen Gesetzen, woraus sich die Geltung des Newton'schen Gravitationsgesetzes auch für die Fixsternwelt ergibt.

Der Doppelstern ζ Herculis wurde schon 1782 als solcher von Herschel erkannt; da derselbe nur eine Umlaufzeit von 37 Jahren hat, so konnte der vollständige Umlauf schon 2mal beobachtet werden. Der Hauptstern ist 3. Gr. und der Begleiter 8. Gr., der erstere ist gelblich, der letztere purpurroth. An diesem Doppelsterne wurde zuerst die Beobachtung einer Sternbedeckung gemacht, indem bei einem Umlaufe der eine Stern genau in die Gesichtslinie des anderen trat und hierdurch die beiden Sterne zu einem einfachen Sterne verschmolzen. Lange Zeit war von den bekannten Umlaufzeiten die von ζ Herculis die kleinste; jetzt kennt man noch einen Doppelstern von 15 Jahren Umlaufzeit, 1037 in Struves Katalog; die Sterne ζ im Krebs und ξ im großen Bären haben ca. 60 Jahre Umlaufzeit. Der Castor, α in den Zwillingen, scheint eine Umlaufszeit von fast 1000 J. zu haben; der Abstand beider Theile beträgt jetzt 5″; die beiden Sterne sind 2. und 3. Gr. und grünlich schimmernd. Die Bahnen der Doppelsterne sind Ellipsen von großer Excentricität von durchschnittlich 0,4; γ virginis hat sogar ein Exc. von 0,9; an diesem Sterne hat Encke zuerst die Geltung der Keppler'schen Gesetze wahrgenommen. Interessant sind die Farben der Doppelsterne; während die einfachen Sterne meist weiß oder höchstens gelblich und röthlich sind, kommen bei den Doppelsternen auch blaue und grüne Sterne vor und zwar hat gewöhnlich der Begleiter diese Farben, während der Hauptstern ebenfalls meist weiß und manchmal gelb oder roth ist; demnach hat in manchen Doppelsternen der Begleiter die complementäre Farbe von der des Hauptsternes. Zöllner hält dieselbe meist für eine Wirkung des Contrastes; doch kann sie auch den Sternen eigen sein, da auch andere Farbenpaare vorkommen; so ist in λ Widder, ε Perseus u. A. ein blauer oder rother Be-

gleiter neben einem weißen Hauptsterne, δ Schlange, ζ Krebs bestehen aus 2 blauen und 2 gelben Sternen; in κ Argo ist der Hauptstern blau und der Begleiter dunkelroth. Außerdem haben spectralanalytische Untersuchungen von complementären Doppelsternen z. B. von β Cygni (Huggins 1868) ergeben, daß im Spectrum des orangefarbigen Sternes zahlreiche dunkle Linien das Blau und Violett schwächen, während in dem blauen Begleiter Gelb, Orange und Roth von dichten dunkeln Streifengruppen durchzogen sind; die complementären Farben sind also hier nicht subjectiv, sondern den Sternen eigen. Einen hübschen Anblick gewähren mehrfache Sterne mit verschiedenen Farben; das Trapez des Orion befindet sich neben dem Nebel des Orion, die Idee erweckend, daß seine Sterne sich aus demselben gebildet hätten, worauf auch noch die Vermehrung der Vierzahl auf 6 hinweist. — Bessel fand (1844) in der Eigenbewegung des Sirius und des Prokyon solche Unregelmäßigkeiten, wie sie auch bei den Bestandtheilen der Doppelsterne wegen ihrer Revolution beobachtet werden, und schloß hieraus, daß diese Sterne **dunkle Begleiter** haben müßten. Peters berechnete die Elemente der Bahn des Siriusbegleiters um den Schwerpunkt des Systems und fand die Umlaufzeit = 49 J.; endlich wurde 1862 ein schwacher Stern neben dem Sirius zuerst von Clark in Boston und dann seitdem mehrfach von Anderen mit sehr guten Fernrohren gesehen; von Auwers wurde (1863) nachgewiesen, daß derselbe mit dem von der Rechnung geforderten dunkeln Begleiter übereinstimme, wenn dessen Masse = 1/2 der Siriusmasse sei; sonach ist dieser Begleiter planetarischer Natur. Auch den dunkeln Begleiter des Prokyon fand Struve (1874) an der Stelle, die Auwers nach der Rechnung angegeben hatte; hiernach ist Prokyon = 80, der Begleiter = 7 Sonnenmassen. — Die Doppelsterne haben eine wichtige Anwendung zur Prüfung der Fernrohre; ein Fernrohr mit 2″ Objectiv muß ξ Ursae majoris zerlegen, eines von 3″ den Castor, von 5—6″ den Rigel, ein vorzügliches Fernrohr muß im Trapez des Orion 6 St. zeigen und den Begleiter von γ Andromedae als doppelt erkennen lassen.

559 **Das Wesen der Fixsterne; das Sternsystem** (Mädler 1840). Die Fixsterne sind Sonnen; dies folgt daraus, daß sie trotz ihrer großen Entfernung doch noch so hell leuchten, und daß ihr Spectrum mit dem Sonnenspectrum übereinstimmt. Alle mit bloßem Auge und mit Fernrohren sichtbaren Fixsterne bilden ein zusammengehöriges Ganzes, ein Sternsystem oder Astralsystem; unser Sternsystem besteht aus einem sphäroidalen, stark abgeplatteten Sonnenhaufen, nahezu von Linsenform, und einem Sonnenringe, der den Sonnenhaufen in der Richtung seiner größten Ausdehnung umzieht, und der uns wegen seiner großen Entfernung als ein zusammenhängender, den ganzen Himmel durchziehender, lichtwolkenartiger Streifen erscheint, den wir Milchstraße nennen. In dem Sonnenhaufen und dem Sonnenringe sind die einander nächsten einfachen Sonnen Bill. M. von einander entfernt und drehen sich wie auch die mehrfachen Sonnen (nach Mädler) um den Schwerpunkt aller Sonnen, der im Sternbilde der Plejaden in der Nähe des Sternes Alkyone liegt und so die Mitte des Milchstraßenringes einnimmt. Unsere Sonne steht, 573 Jahre Lichtzeit von der Alkyone entfernt, von diesem Centralpunkte aus gesehen nach Süden zu, nach der Gegend des Skorpions und des Schützen, in derjenigen Hälfte des Sonnenhaufens, die den Herbstpunkt enthält; indessen ist sie doch verhältnißmäßig nicht weit vom Centrum des Sternsystems entfernt, da der Durchmesser des Milchstraßenringes 7700 Jahre Lichtzeit beträgt. Die Masse unseres Sternsystems enthält nach Mädler mehr als 100 Mill. Sonnenmassen; viele Fixsterne sind größere und glänzendere Sonnen als unsere Sonne, deren Umlaufzeit um die Alkyone 22 Mill. Jahre beträgt, bei einer Geschwindigkeit von 7 1/3 M.

Daß die Fixsterne Sonnen sind, ja oft noch mehr Leuchtkraft als unsere Sonne besitzen, ergibt eine einfache Rechnung. Der Sirius ist 14 J. L., also 900 000mal weiter als die Sonne von uns entfernt; wäre sein Licht für uns so stark wie das Sonnenlicht, so müßte seine Leuchtkraft $900\,000^2 = 810\,000$ Mill. mal stärker als die der Sonne sein; da aber für uns sein Licht nach Wollaston nur 20 000 Mill. mal schwächer als das Sonnenlicht ist, so muß seine Leuchtkraft die der Sonne 810 000 : 20 000, also 40mal übertreffen.

Nach den Spectraluntersuchungen von Huggins und Secchi ist das **Spectrum der Fixsterne** ein Absorptionsspectrum, also ein continuirliches Spectrum mit dunkeln Fraunhofer'schen Linien, wie das Sonnenspectrum. Hieraus wird geschlossen, daß die Fixsterne wie die Sonne weißglühende flüssige Körper, von einer Dampfhülle umgeben seien; aus den dunkeln Linien erkennt man die Stoffe dieser Dampfhülle und findet so, daß sie

meist mit irdischen Stoffen übereinstimmen. Die Spectra der Fixsterne sind indessen nur der Art nach einander gleich, bieten aber in der Zahl und Stellung der Linien Unterschiede, die sich jedoch nach Secchi auf 4 Typen zurückführen lassen, welche sich auch meist schon in den Farben unterscheiden. Der erste Typus kommt oft bei weißen Sternen wie Sirius und Wega vor; dieselben haben in allen Farben außerordentlich feine, ziemlich gleichmäßig vertheilte dunkle Linien, wodurch sich die weiße Farbe erklärt, und 4 breite dunkle Streifen, welche dem Wasserstoffsp. angehören. Die Atmosphäre dieser Sterne besteht also überwiegend aus Wasserstoff, es sind wahrscheinlich die größten und schwersten Sonnen, welche mit ihrer großen Schwere alle dichteren Stoffe in den Kern herabziehen. Der zweite Typus findet sich bei gelblichen Sternen wie Capella, Pollux, Arcturus; das Sp. derselben stimmt mit dem der Sonne überein, enthält zahlreiche starke und dunkle Linien im Roth und Blau, weniger im Gelb, wodurch die gelbe Farbe erklärlich wird. Hervorragend sind die Linien von Wasserstoff und Eisen, ja das Sp. des Aldebaran, der schon mehr röthlich den Uebergang vom 2. zum 3. Typus bildet, zeigt sogar das Vorhandensein von Quecksilber, Antimon, Tellur und Wismuth an; diese Sterne sind weniger groß, ihre geringere Schwerkraft läßt auch die schweren Dämpfe in die Hülle steigen, die hauptsächlich aus Wasserstoff und Eisendampf besteht. Der dritte Typus umfaßt röthliche Sterne wie Beteigeuze, α Herculis, Mira ceti, Antares, jedoch auch farblose und veränderliche; das Sp. enthält breite, dunkle Banden, die nach d'Arrest (1874) aus eng beisammen stehenden Linien gebildet sind, welche nach dem Blau hin an Stärke zunehmen, wodurch die Banden nach dem Blau zu scharf begrenzt, nach dem Roth zu verwaschen erscheinen. Im Sp. der röthlichen Sterne sind die Banden im blauen Theile vorwiegend; diese Sonnen sind wahrscheinlich schon in niederer Gluth, haben daher dunst- und wolkenerfüllte Atmosphären. Der 4. Typus enthält rothe und veränderliche Sterne unter 6. Gr.; ihr Sp. enthält 1 rothe, 1 grüne und eine blaue Zone, welche durch dunkle Banden getrennt sind, die umgekehrt zum 3. Typus nach dem Roth zu scharf, nach dem Blau hin verwaschen erscheinen (Vogel 1874, d'Arrest 1875). Die Hälfte der untersuchten Sterne gehört dem 1. Typus, ²/₃ der anderen Hälfte dem 2. Typus an. Seltene Sterne mit hellen Spectralstreifen sind in der letzten Zeit zu einem 5. Typus zusammengestellt worden.

Daß die Fixsterne ein zusammenhängendes Ganzes, ein Sternsystem bilden, ergibt sich aus folgenden Erwägungen: 1. Jeder Stern schwebt frei im Weltraume unter einer großen Anzahl sehr großer Massen, welche sämmtlich anziehend wirken, was durch die Geltung der Keppler'schen Gesetze bei den Doppelsternen zweifellos geworden ist. Alle diese Anziehungen haben eine Resultante, welche nach dem Schwerpunkte aller Massen gerichtet ist und demnach dem Sterne eine Bewegung um diesen Schwerpunkt ertheilen muß; jeder Stern wird folglich von allen übrigen bewegt, bildet mit diesen ein zusammenhängendes Ganzes. 2. Die Sterne zeigen eine verhältnißmäßig beträchtliche Eigenbewegung und bestätigen hierdurch diese Folgerung; diese beträchtliche Eigenbewegung kann nur durch die Anziehung einer bedeutend überwiegenden Masse entstehen; da eine solche Centralmasse nirgendswo im Fixsternraume vorhanden ist, so kann an ihrer Stelle nur die vertheilte Masse aller Fixsterne genügen. 3. Die Eigenbewegung der Doppelsterne ist durchschnittlich 5mal größer als die Drehbewegung ihrer Bestandtheile; da die letztere durch die verhältnißmäßig einander sehr nahen Bestandtheile erzeugt wird, und da in der Nähe größere anziehende Massen sich nicht finden, so kann die starke Eigenbewegung nur durch die Anziehung entfernterer Massen entstanden sein, die wegen der großen Entfernung auch eine sehr bedeutende Größe haben müssen, die nur durch den Complex der übrigen Sterne gegeben ist. 4. In vielen Nebelflecken erkennt die Astronomie sehr entfernte Sternsysteme, sogar einige von derselben Gestalt, wie sie unserem Sternsysteme zugeschrieben wird, eine Lichtwolke mit einem Lichtringe; durch diese Analogie gewinnt die Hypothese unseres Sternsystems an Wahrscheinlichkeit.

Wegen der ziemlich gleichmäßigen Vertheilung der Sterne in unserem Sternsysteme muß der Schwerpunkt in dem Mittelpunkte des Haufens und des Ringes liegen. Da die Milchstraße uns den Himmel nicht in zwei gleiche Theile theilt, so kann unsere Sonne nicht in der Ebene der Milchstraße stehen, sondern etwas außerhalb derselben in der größeren Hälfte, die den Herbstpunkt enthält; da außerdem der Theil der Milchstraße, der durch Stier und Orion zieht, nur einen schwachen Schimmer, der diametrale Theil im Adler und Schwan aber den stärksten Glanz besitzt, so kann die Sonne auch nicht auf der Achse des Ringes stehen, sondern südwärts nach dem Skorpion und Schützen zu; dies wird noch dadurch bekräftigt, daß in diesen Gegenden die Milchstraße getheilt, in der diametralen aber einfach ist; John Herschel und Mädler glauben nämlich, die Milchstraße bestehe ähnlich dem Saturnsringe aus mehreren Sonnenringen, die aus größerer Nähe perspectivisch getrennt, in großer Entfernung dagegen vereinigt erscheinen müssen. Aus dieser Lage unserer Sonne gegen den Schwerpunkt folgt einfach durch Umkehrung, daß dieser Schwerpunkt von uns

aus gegen die kleinere Himmelshälfte zu in nördlicher Richtung in den Sternbildern Widder, Stier, Zwillinge oder Orion liegen müsse. Um die Lage genauer fest zu stellen, zeigte Mädler zunächst, daß in einem solchen globularen Systeme die Anziehung sich nicht im umgekehrten Verhältnisse zum Quadrat der Entfernung, sondern direct wie die Entfernung selbst verändere, und daß daher die Geschwindigkeiten des Umlaufes nicht wie im Sonnensystem sich umgekehrt wie die Wurzeln der Entfernungen, sondern wie die Entfernungen selbst verhalten. Demnach müsse der Schwerpunkt selbst in Ruhe sein und könne daher keine andere Eigenbewegung zeigen als die Abspiegelung der Sonnenbewegung, und die nach Abzug dieser Abspiegelung übrig bleibende Eigenbewegung der anderen Sterne müsse mit dem Abstande vom Schwerpunkte zunehmen. Mädler zeigt aus den Eigenbewegungen, daß diese Bedingungen am genauesten für Alkyone erfüllt sind, daß also in der Nähe derselben der Schwerpunkt unseres Systems liegt. Aus der Beobachtung, daß die Sonne und 61 Cygni mit Alkyone ein gleichschenkeliges Dreieck bilden, berechnet dann Mädler mittels der Parallaxe, 0,374″ und der jährlichen Eigenbewegung 4,067″ dieses Sternes seine und dadurch der Sonne Geschwindigkeit; hieraus lassen sich dann die Parallaxe der Alkyone, also deren Entfernung, sowie die Masse und Dimensionen des ganzen Systems berechnen. — Wilhelm Herschel hatte zuerst angenommen, die Milchstraße sei die Kante von der Linsenform unseres Sternsystems; da aber alsdann ein allmäliger Uebergang von der Milchstraße zu dem übrigen System stattfinden müßte, während doch eine plötzliche Begrenzung der Milchstraße nicht zu verkennen ist, und da die Ringform in den Nebelflecken wie im Saturn sich wiederholt, so neigte sich Herschel wie sein Sohn später zur Annahme des Ringsystems.

560 **Die Sternhaufen und Nebelflecken** (W. und J. Herschel 1786—1864, Huggins 1866). Das Sternsystem besteht zwar in der größten Zahl seiner vielen Millionen Glieder aus Einzelsonnen, die unabhängig von einander um den Schwerpunkt kreisen; aber es enthält doch schon in den Doppel- und mehrfachen Sternen Partialsysteme, welche für sich ein kleineres Ganzes bildend als solches um den Schwerpunkt gehen, und so die Vermuthung erwecken, daß auch noch reichere Sonnengruppen als Partialsysteme dem Ganzen angehören könnten, welche Vermuthung man durch die Sonnenhaufen für bestätigt hält. Wie nämlich das Sternbild der Plejaden einem blöden Auge nur als Lichtnebel erscheint, sich aber für ein schärferes Auge in 6 Sterne auf einem Lichtgrunde auflöst, der wieder durch ein Fernrohr in eine enge Gruppe kleiner Sterne verwandelt wird, wie die Krippe im Krebse, das Haupthaar der Berenike, die Lichtwolke im Schwerte des Perseus bei näherem Zusehen als enge Gruppirungen einzelner Sterne erscheinen, so entdeckt ein schwaches Fernrohr viele Lichtwolken, die durch ein stärkeres sich in Sterne auflösen, so sieht das schärfere Fernrohr wieder neue Nebel, die für ein noch schärferes ebenfalls in Sterne zerfallen, während auch für dieses wieder neue unauflösbar scheinende Lichtwölkchen, Nebelflecken genannt, auftauchen. Was durch schwache Fernrohre oder mit blosem Auge als Nebel, durch ein schärferes aber in Sterne aufgelöst erscheint, wird als Sternhaufen bezeichnet; die Sternhaufen haben häufig Kugelgestalt, bestehen aus vielen Tausenden von dichtgedrängten Sternen, in denen manchmal ein rother oder ein Doppelstern durch Größe hervorragt, gewöhnlich aber die Zahl der Sterne und die Helligkeit nach außen abnimmt; der Name Nebelflecken wird gewöhnlich den nicht aufgelösten Lichtwölkchen gegeben. Die Zahl derselben ist sehr groß; schon W. Herschel fand 2300 Nebelflecken. Die Form ist sehr verschieden; der große Nebel im Orion ist in hohem Grade unregelmäßig, zerrissen und verästelt, die Crab-Nebula im Stier sieht aus wie ein Krebs, andere sind spiralförmig um einen Mittelstern gewunden, wie der Nebel in den Jagdhunden, andere sind ringförmig um ein Mittelwölkchen gezogen, wie der Nebel in der Leier, andere haben mehrfache Ringe, andere bilden nur einen elliptischen Ring oder auch eine ganz ausgefüllte Ellipse oder Linse, ja auch Doppelnebel kommen vor. Die Begrenzung der genannten Nebel ist meist unbestimmt und verwaschen; scharf begrenzte Nebel heißen planetarische Nebel, weil ihr bläuliches gleichmäßiges Licht dem Planetenlichte ähnlich ist; auch diese sind kreisförmig, elliptisch, ring- und spiralförmig, haben auch manchmal hellere Lichtkerne und kommen dadurch den Nebelsternen nahe, in welchen ein scharf begrenzter Stern von einer runden Lichtscheibe oder auch von einem verschwimmenden Lichtwölkchen umgeben ist. Die Größe der Nebelflecken geht von mehreren Graden bis zu wenigen Secunden; die größten sind die Magelhaenschen Wolken am Südpole und der Orionnebel. Viele dieser Gebilde, die Herschel als unauflöslich angab, sind von Lord Rosse aufgelöst oder wenigstens als auflöslich bezeichnet worden. Es wurde dadurch die Vermuthung nahe gelegt, alle Nebel seien auflöslich, wenn nur die Vergrößerung der Fernrohre hinreichend sei, sie seien meistens Sternsysteme, die weit außerhalb unseres Sternsystems demselben ähnliche Weltinseln darstellen dürften, während man die Sternhaufen für Partialsysteme erklärte, die innerhalb unseres Sternsystems wie die einfachen und Doppelsterne um den Schwerpunkt kreisen; nur die plane-

tarischen Nebel und die Nebelsterne hielt man zwar auch für Glieder unseres Sternsystems, aber für wirkliche Nebelmassen, die im Begriffe seien, sich zu Sonnen zu verdichten. Diese Vermuthungen wurden im Allgemeinen durch die Spectraluntersuchungen von Huggins bestätigt; die Sternhaufen, die aufgelösten und die von Rosse als auflöslich (resolvable but not resolved) bezeichneten Nebel haben sämmtlich continuirliche Spectra, bestehen also aus Sonnen, von 11 nicht auflösbar genannten Nebeln hatten 6 ein continuirliches, 4 ein Streifenspectrum, die planetarischen Nebel dagegen sämmtlich Streifenspectra, wodurch die letzteren als leuchtende Gasmassen, und zwar der Hauptsache nach als Stickstoff und Wasserstoff erkannt wurden; aber auch manche nicht planetarischen Nebel wie der große Nebel im Schwertgriff des Orion haben Streifenspectra, sind also ebenfalls leuchtende Gasmassen, welche sich zu Sternen condensiren; so macht das Trapez im Orion den Eindruck, als ob sich die Nebelmasse von ihm zurückgezogen habe; früher sah man in dem Trapez nur 4 Sterne, während man jetzt 2 mehr sieht, welche nach der Meinung einiger Forscher sich inzwischen gebildet hätten. Auch in Herschels Dumb-bell-Nebel konnte man solche Aenderungen erkennen; denn während er nach Herschel die Gestalt von 2 Balancirkugeln oder Handeln hatte, ist nach Rosse keine Aehnlichkeit mit dieser Form mehr zu sehen. Der Andromeda-Nebel, der mit scharfen Augen ohne Fernrohr sichtbar ist, hatte nach Marius die Gestalt eines durch ein Hornblättchen scheinenden Lichtes, während Bond, der den Fleck auflöste, in demselben zwei schwarze Linien wahrnahm. Von Bewegungen konnte an diesen unbestimmten Gebilden noch nichts beobachtet werden. Die südliche Halbkugel enthält weniger aber gleichmäßig vertheilte Nebel, die nördliche mehr aber in einzelne Nebelregionen zusammengedrängt; die Nebelregion im Flügel der Jungfrau enthält 1/3 aller Nebel. Die 2 Magelhaen'schen Wolken am Südpole enthalten Sternhaufen, auflösliche und nicht auflösliche dicht gedrängte Nebel, einfache und vielfache Sterne; die große Wolke hat allein 300 Nebel aufzuweisen.

561 Aufg. 806. Die A. R. und D. zweier Sterne seien bezüglich α und α', δ und δ'; wie groß ist ihre Bogendistanz? And.: Die Distanz ist die 3. Seite eines sphärischen Dreiecks, dessen 2 andere Seiten $90-\delta$ und $90-\delta'$ den Winkel $\alpha-\alpha'$ einschließen. Berechnet man nun nach Vorschrift der sphärischen Trigonometrie $\cotg y = \cotg \delta \cos(\alpha-\alpha')$, so ergibt sich für die Distanz d der Ausdruck $\cos d = \cos\delta \sin(\delta' + y) : \sin y$. — A. 807. Die D. eines Sternes sei δ, die A. R. in Stunden ausgedrückt $= \alpha$; wie groß ist zur Zeit t (t St. nach Mittag) die Höhe h und das Azimuth a? Aufl.: Ist $\cotg y = \cotg\delta \cos(\alpha - t)$, so ist $\sin h = \sin\delta \cos(\varphi - y) : \sin y$ und $\sin a = \cos\delta \sin(\alpha - t) : \cos h$, worin φ die geogr. Br. oder Polhöhe des betreffenden Ortes bedeutet. — A. 808. Aus der Länge l und Breite b eines Sternes seine A. R. und D. zu berechnen? Aufl.: Ist w die Schiefe der Ekliptik und $\tg y = \tg w \sin l$, so ist $\sin\delta = \cos w \sin(b + y) : \cos y$ und $\cos\alpha = \cos l \cos b : \cos\delta$. — A. 809. Aus der A. R. und D. und der Schiefe der Ekliptik die Länge und Breite zu finden? Aufl.: Ist $\tg y = \tg w \sin\alpha$, so ist $\sin b = \cos w \sin(\delta - y) : \cos y$ und $\cos l = \cos\alpha \cos\delta : \cos b$. — A. 810. Aus der Höhe h, dem Azimuth a eines Sternes und der Beobachtungszeit die A. R. und D. desselben zu bestimmen? Aufl.: Ist $\cotg y = \cotg h \cos a$, so ist $\sin\delta = \sin h \cos(\varphi - y) : \sin y$ und $\sin(\alpha - t) = \cos a \cos h : \cos\delta$. — A. 811. Nach wieviel Jahren wird der Nordpol im Sterne Wega stehen? Aufl.: 12000 Jahre. — A. 812. Nach wieviel Jahren ist der Frühlingspunkt, der jetzt in den Fischen liegt, 110 Grade weiter westlich im Antares? Aufl.: 7800 J. — A. 813. Als man sich überzeugt hatte, daß die Parallaxe keines Fixsternes 1″ erreiche, was stand alsdann über deren Entfernung fest? Aufl.: Daß sie größer sei als 206265 Erdweiten oder 4 Bill. Meilen. — A. 814. Wie groß wäre die Entfernung eines Sternes, dessen Parallaxe = 0,01″? Aufl.: 20,6 Mill. Erdweiten oder 320 Jahre Lichtzeit. — A. 815. Zu beweisen, daß die Anziehungen in Inneren einer anziehenden Kugel also eines globularen Systems sich direct wie die Entfernungen verhalten. And.: Sind die Entf. zweier Massen m und m′ vom Mittelpunkte = D und d, so verhalten sich die Anziehungen K und $k = (m : D^2) : (m' : d^2)$, weil die Anziehungen außerhalb dieser Massen sich neutralisiren; da nun $m : m' = D^3 : d^3$, so ergibt sich $K : k = D : d$. — A. 816. Als Mädler zuerst seine Berechnung der Massen unseres Sternsystems = 186 Mill. Sonnenmassen veröffentlichte, erhob man dagegen Einsprache, weil man nach den damaligen Sternzählungen oder Sternaichungen eine übergroße Masse für die einzelnen Sonnen hätte annehmen müssen; was könnte man nach Littrows Zählung einwenden? Aufl.: Eine zu kleine Masse der Sonnen.

562 **Das Sonnensystem.** Um unsere Sonne drehen sich 8 große Planeten mit etwa 20 Nebenplaneten, mehr als 180 kleine Planeten oder Planetoiden, zahlreiche Kometen und zahllose ganz kleine Weltkörper oder Asteroiden, sowohl einzeln als in größeren Schwärmen oder ganzen Ringen. Die Ursache dieser Drehung liegt in der lebendigen Kraft sämmtlicher Weltkörper, vermöge welcher sie nach dem Gesetze

der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen würden, und in der Anziehung der Sonne, vermöge welcher sie fortwährend von der geraden Linie abgelenkt und so um die Sonne bewegt werden. Die Masse der Sonne übersteigt nämlich 800fach die Masse aller oben genannten Weltkörper; ihre Anziehung ist daher so überwiegend, daß der Mittelpunkt der verschiedenen Anziehungen in die Sonne fällt, und daß sonach die Drehung um die Sonne stattfinden muß. Die Gesetze dieser Drehungen sind die Kepplerschen Gesetze, die schon in 142. betrachtet wurden.

Das moderne Weltsystem lautet nach dem Vorausgehenden: die Nebenplaneten drehen sich in Ellipsen um die Hauptplaneten, die Hauptplaneten in Ellipsen um die Sonnen, und die Sonnen um den Schwerpunkt aller Sonnen im Sternbilde der Plejaden. Dieses System ist nur eine weitere Ausbildung des Copernikanischen Systems (1543), welches lehrte, daß die Nebenplaneten um die Hauptplaneten und diese um unsere Sonne kreisen, welche in Ruhe den Mittelpunkt des Systems einnehme. Diesem System entgegengesetzt hatte das Ptolemäische System (150 n. Chr.) den Inhalt, daß die Erde den ruhenden Mittelpunkt bilde, daß um diese zunächst der Mond, dann Mercur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn, jeder Weltkörper sich in einer eigenen Sphäre drehe, welche von einer 8ten Sphäre, dem Fixsternhimmel, umschlossen sei. Das moderne Weltsystem unterscheidet sich nur darin von dem Copernikanischen, daß es durch Keppler die Ellipse als Bahnform an die Stelle des Kreises setzte, daß es auch der Sonne mit allen anderen Sonnen unseres Sternsystems eine Bewegung um den Schwerpunkt desselben zuschreibt, ja sogar eine Drehung aller Sternsysteme um den Schwerpunkt des Weltganzen vermuthet.

Unterschiede zwischen Planeten und Fixsternen. Da die Fixsterne und Planeten dem gewöhnlichen Blicke als nahezu gleiche Sterne erscheinen, so ist es angezeigt, die Unterschiede hervorzuheben. 1. Die Fixsterne haben zitterndes Licht, die Planeten ruhiges Licht. 2. Die F. behalten ihre gegenseitige Stellung nahezu bei, die P. wandern zwischen den F. hin und her. 3. Die Fixsterne erscheinen durch ein Fernrohr nur als leuchtende Punkte, die P. als leuchtende Kreisscheiben. 4. Die F. sind Sonnen, d. h. sie haben Licht und Wärme durch sich selbst; die P. aber sind dunkle, kalte Körper und erhalten Licht und Wärme von den Sonnen. 5. Die Fixsterne sind Kugeln meist von mehr als 200000 M. Durchmesser, während die P., wenigstens die um unsere Sonne kreisenden, nur bis zu 20000 M. Durchmesser gehen; eine Ausnahme ist bis jetzt in dem Begleiter des Sirius bekannt. 6. Die F. gehen um den Schwerpunkt aller Sonnen, die P. um die Sonnen. 7. Die Bewegung der F. geschieht mit einer Geschwindigkeit von 6—12 M., die der P. mit 6 bis ²/₃ M. Geschwindigkeit.

Unterschiede zwischen Planeten und Kometen. Die P. und K. stimmen darin überein, daß sie nach gleichen Gesetzen um die Sonne laufen; es ist daher auch hier das Hervorheben der Unterschiede zweckmäßig. 1. Die P. erscheinen uns als kleine Sterne, die K. treten nur selten in der gewöhnlich angenommenen Form eines sternartigen Kernes mit Nebelhülle oder Bart und Schweif auf, sondern meist in der Form von teleskopischen Lichtwölkchen. 2. Die P. gehen im Ganzen von Westen nach Osten um die Sonne, die K. auch von Osten nach Westen. 3. Die P. erscheinen für das Fernrohr als dichte, undurchsichtige Scheiben, die K. aber sind durchsichtige, verwaschene Massen von unbestimmter, wechselnder Form. 4. Die P. sind kalte, dunkle, feste Kugeln, die K. Ansammlungen von Dunst oder von verhältnißmäßig weit aus einander stehenden kleinen Körpern, in Bart und Schweif wohl auch aus Dunst. 5. Die P. erreichen höchstens einen Dm. von 20000 M., die K. nehmen oft Millionen von M. am Himmel ein. 6. Die P. haben einen dichten, festen Stoff, die K. einen so lockeren Stoff, daß nicht blos durch Bart und Schweif, sondern sogar durch den Kern hindurch kleine Sterne gesehen werden können. 7. Die P. haben eine sehr große Masse; so wiegt die Erde 7 Quadrillionen kg; die K. haben nur eine sehr kleine Masse, wiegen manchmal vielleicht nur wenige Centner. 8. Die P. üben daher einen stark störenden Einfluß auf die K. aus, verändern die Bahnen derselben oftmals sehr stark, ja zehren dieselben allmälig auf, während die K. selbst an kleinen Trabanten der Pl. keine Veränderung hervorbringen können, wenn sie auch ganz nahe an denselben vorbeigehen. 9. Die Bahnen der P. sind stark kreisähnliche Ellipsen, die der K. lang gestreckte Ellipsen, ja sogar Parabeln und Hyperbeln. 10. Die P. entfernen sich daher nicht sehr weit von der Sonne, die K. aber gehen in ungeheure Fernen von der Sonne, ja mögen wohl manchmal aus dem Unendlichen (von einer anderen Sonne her) in unser Sonnensystem herein kommen, um die Sonne gehen und auf der anderen Seite wieder ins Unendliche hinaus schweifen. 11. Die Geschw. der P. in ihrer Bahn ist deßhalb nahezu dieselbe, die Geschw. der K. aber sehr verschieden, steigt im Perihel bis auf 60 M. und mag im Aphel bis auf kleine Bruchtheile von 1 M. hinab gehen. 12. Die Planeten sind

immer sichtbar, die Kometen aber nur selten und zwar, wenn sie in die Sonnennähe kommen. 13. Die Planeten wandeln sehr langsam, die Kometen rasch zwischen den Fixsternen hin und her.

Die Entstehung unseres Sonnensystems. Kant und Laplace setzen einen gleichmäßig in dem Raume des Sonnensystems vertheilten Urnebel voraus; da den Molekülen der Luftarten fortschreitende Bewegung zugeschrieben werden muß oder denselben immanent ist, und da die etwa verschiedenen Richtungen und Geschwindigkeiten derselben sich allmälig ausgleichen mußten, so erhielt hierdurch die ganze Masse eine fortschreitende Bewegung. Bei diesen Bewegungsausgleichungen mußten aber auch Massentheilchen zusammentreffen, sich einander festhalten und dadurch einen Kern bilden, der durch Anziehung immer mehr Moleküle an sich sammelte und so die ganze Masse zu einer flüssigen Kugel verdichtete, welche eben durch die Verdichtung eine außerordentlich hohe Temperatur erhielt, und sich trotz derselben unter dem hohen Drucke der jedenfalls ungeheuren Atmosphäre flüssig erhalten konnte. Durch das Strömen der Theilchen nach dem Kerne zu mußten dieselben auch auf einander treffen und sich so in eine rotirende Bewegung um den Mittelpunkt versetzen. Es entstand also ein flüssiger Ball von großen Dimensionen und großer Hitze, der in dem kalten Weltraume durch Strahlung Wärme verlor und sich dadurch zusammenzog; hierdurch wurde die Drehungsgeschwindigkeit größer, weil die dem Mittelpunkte näher rückenden Massen ihre größere Geschwindigkeit dorthin trugen. Durch diese schnellere Drehung, genauer gesagt, durch die gleich bleibende Geschwindigkeit bei kleinerem Krümmungsradius wurde aber die Centrifugalkraft größer und konnte endlich so groß werden, daß sich Massen an dem Aequator der großen Kugel loslösten, und sich in derselben Richtung wie das Ganze um dieses und um sich selbst drehten. Ein Nachahmungsversuch dieser Weltbildungshypothese ist die **Plateau'sche Kugel** (s. 152.). Aus dieser Theorie erklärt es sich, warum sämmtliche Planeten mit ihren Trabanten von Westen nach Osten um die Sonne und um sich selbst gehen, in derselben Richtung, in der die Sonne um sich selbst rotirt, warum alle diese Weltkörper ihre Bahnen in dem Gürtel des Thierkreises, nicht weit von dem Sonnenäquator, vollenden, warum die größten Massen, die großen äußeren Planeten weniger dicht sind als die kleineren inneren, indem jene zur Zeit geringerer Verdichtung sich schon loslösten, und warum diese großen Planeten noch selbstleuchtend, also wahrscheinlich noch glühend sind, indem dieselben sich noch nicht ganz abkühlen konnten; endlich erklärt sich die hohe Temperatur des ursprünglichen Ganzen, unserer Sonne, und die Fortdauer derselben, indem die Zusammenziehung immer noch stattfindet. Man hält es für keinen Widerspruch, daß viele Kometen und Asteroiden rückläufig sind, d. i. von Osten nach Westen um die Sonne gehen, und daß sie auch alle nur denkbaren Winkel in der Lage ihrer Bahnen gegen die Ekliptik darbieten, indem man annimmt, daß diese Weltkörper erst später aus dem Weltraume in unser Sonnensystem hineingekommen sind.

3. Die Sonne.

Entfernung und Dimensionen der Sonne. Die mittlere Entfernung der Sonne von der Erde beträgt nach den vorläufigen Ergebnissen des Venusdurchganges vom 8. Dec. 1874 in runder Zahl 20 Mill. M.; dieselbe wurde bestimmt mittels der **Horizontalparallaxe** der Sonne. Die Horizontalparallaxe eines Gestirnes ist der Winkel, unter welchem von dem Gestirne aus derjenige Halbmesser der Erde erscheint, für dessen Oberflächenpunkt das Gestirn im Aufgange begriffen ist; sie ist daher ein Winkel in einem rechtwinkeligen Dreiecke, dessen Gegenkathete der Halbmesser der Erde und dessen Hypotenuse die gesuchte Entfernung ist, welche demnach aus der Horizontalparallaxe und dem Erdhalbmesser nach den Regeln der Geometrie berechnet werden kann. Der wahrscheinliche Werth der Parallaxe ist 8,88″; aus diesem ergibt sich die erwähnte Entfernung der Sonne. Wenn diese einmal bekannt ist, so kann auch der Durchmesser der Sonne berechnet werden; der mittlere scheinbare Durchmesser der Sonne ist nämlich nach Messungen mit dem Heliometer = 32′; die Hälfte desselben ist ein Winkel eines rechtwinkeligen Dreiecks, dessen anliegende Kathete die Entfernung und dessen Gegenkathete der Radius der Sonne ist, der somit leicht gefunden werden kann. So findet man den Durchmesser der Sonne = 190 000 M., woraus das Volumen der Sonne sich gleich 1 1/4 Mill. Erdinhalten ergibt. Mit der Entfernung von der Sonne kennt man auch die 563

Bahn der Erde und kann daraus berechnen, um wieviel die Erde in jeder Secunde durch die Anziehung der Sonne von der geraden Linie abgelenkt wird, wodurch man ein Maß für die Anziehung der Sonne gewinnt; da man in ähnlicher Weise durch die Bahn des Mondes ein Maß für die Anziehung der Erde (77.) erhalten kann, so bietet sich durch Vergleichung der beiden Anziehungen ein Mittel, die Masse der Sonne = 340 000 Erdmassen zu finden. Aus dieser Zahl und der Größe der Sonne ergibt sich dann die Schwerkraft der Sonne als die 28fache der Erde, und die Dichte der Sonne = 1/4 der Erddichte. Die Sonne dreht sich nach Spörer in 25 T. 5 St. 38 Min. um sich selbst und nach Mädler in 22 Mill. Jahren um den Schwerpunkt unsers Sternsystems.

Die Horizontalparallaxe der S. könnte man direct bestimmen, wenn man von dem Orte der Erde, für welchen die Sonne aufgeht oder im Horizont erscheint, (woraus sich auch der Name erklärt) und von dem Orte, für welchen die Sonne im Zenith steht, die Stellung eines und desselben Punktes der Sonne auf dem Himmelshintergrunde beobachten könnte; der Bogenabstand dieser beiden Stellungen ergäbe dann die Horizontalparallaxe. Allein dies ist nicht möglich, weil der Himmelshintergrund hierbei von der Sonne beleuchtet ist und so keinen Anhaltspunkt bietet, und weil außerdem feste Punkte an der Sonne, die von verschiedenen Erdorten aus sichtbar wären, nicht existiren. Solche Punkte werden aber markirt, wenn die Venus zwischen uns und der Sonne vorbeigeht, weil bei einem solchen Durchgange der Planet uns als dunkler Kreis auf der großen leuchtenden Sonnenscheibe erscheint; und die zu beobachtenden Punkte sind der Berührungspunkt der Venus und der Sonne von außen und von innen beim Anfange, und von innen und von außen beim Ende der Passage. Werden diese Punkte von verschiedenen Orten der Erde nach Zeit und Ort genau bestimmt, so kann man daraus die Horizontalparallaxe berechnen. Nur sind leider die Venuspassagen sehr selten; kommen etwa alle 100 Jahre 2 mal rasch nach einander vor, und die viel häufigeren Mercurdurchgänge geben wegen der großen Entfernung des Mercur von der Erde nur ein ungenaues Resultat; der vorletzte Venusdurchgang geschah 1769; aus dem Resultate der Beobachtung desselben berechnete Encke 1825 die Parallaxe der Sonne = 8,57″ und hieraus die mittlere Entf. = 20⅔ Mill. M. Aber in den letzten Jahrzehnten wurde eine ganze Reihe von Thatsachen gefunden, welche diese Parallaxe als zu klein erscheinen lassen. 1. So wiederholte Powalky mit Berücksichtigung anderer, genauerer Zahlen die Rechnung Enckes und fand 8,86 Sec. 2. Die alten Bestimmungen der Geschw. des Lichtes benutzten die alte mittlere Entf. der Sonne = 20⅔ Mill. M. und ergaben so die Geschw. 42 000 M.; ist nun diese Entf. kleiner, so muß auch die Geschw. des Lichtes kleiner sein; und umgekehrt, wenn die Geschw. des Lichtes durch andere Mittel als zu groß erkannt wird, so muß auch jene Entf. zu groß sein. Nun aber hat die feine Methode Foucaults (1862) und die von Cornu verbesserte Methode Fizeaus (286.) nur 40 000 M. Geschw. ergeben; folglich muß auch die Entf. der Sonne kleiner sein. 3. Kennt man die Entf. eines Planeten von der Sonne, so kann man nach dem 3. Keppler'schen Gesetze auch die der Erde finden; nun bot aber die Opposition des Mars im Jahre 1862 ein Mittel, die Entf. des Mars genau zu bestimmen; aus dieser fand dann Winnecke 8,964″ für die Parallaxe der Sonne, während die genauere Resultate ermöglichende Opposition der Flora (1873) nach Galle 8,88″ ergab. 4. Da die Sonne anziehend auch auf den Mond wirkt, so muß sie die Mondbahn verändern; wenn der Mond zwischen Sonne und Erde steht, so muß sie ihn mehr von der Erde entfernen, und wenn die Erde zwischen Sonne und Mond steht, so muß sie ihn der Erde mehr nähern als gewöhnlich. Dieser Unterschied, den man die Evection nennt, hängt offenbar von der Entfernung der Sonne ab und wird aus derselben vorher berechnet; da er nicht genau so eintrifft, wie er berechnet wurde, so folgt daraus, daß die Entfernung nicht ganz richtig ist, die man nun umgekehrt aus der beobachteten Evection berechnen kann; Hansen fand hieraus 8,916″ für die Parallaxe. 5. Der Mond bildet mit der Erde im Verhältnisse zur Sonne ein Ganzes, dessen Schwerpunkt 642 M. vom Centrum der Erde entfernt ist, welcher Schwerpunkt eigentlich die Ekliptik beschreibt; da nun der Mond nicht in, sondern bald dies-, bald jenseits der Ekliptik steht, so muß auch das Centrum der Erde bald jen-, bald diesseits der Ekliptik liegen, oder die Sonne muß bald nördlich, bald südlich von der Ekliptik zu stehen scheinen. Da auch diese anziehende Wirkung von der Entf. der Sonne abhängt, so konnte Leverrier aus der scheinbaren Abweichung der Sonne von der Ekliptik die Parallaxe der Sonne berechnen und fand für dieselbe 8,95″. 6. Leverrier berechnet aus Störungen der Venus und des Mars Parallaxen von 8,85, 8,86 und 8,87. Die größte Wahrscheinlichkeit hat bis jetzt die Zahl 8,88″, wodurch die bisher angenommene mittlere Entf. der Sonne 20⅔ M. M. sich auf 20 M. M. reducirt.

Da aus dieser alle anderen Maße der Sonne berechnet werden, so müssen dieselben sich auch sämmtlich verändern; die oben angegebenen Zahlen entsprechen dem wahrscheinlichsten Werthe. Aber nicht blos diese Zahlen, sondern auch die meisten anderen Zahlen unseres Sonnensystems ändern sich, da bei ihrer Berechnung immer die Entf. der Sonne zu Grunde liegt; deßhalb wurden von allen civilisirten Nationen seit vielen Jahren Vorbereitungen für die Beobachtung des Venusdurchganges von 1874 getroffen, großartige Expeditionen in die entlegensten Gegenden unternommen und auf mehr als 60 Stationen beobachtet; das genaue Resultat derselben wird indeß erst nach Jahren gewonnen werden können.

Die Masse und die Schwerkraft der Sonne haben wir in Aufg. 94 und nach einer etwas anderen Methode in Aufg. 216 bestimmt. Die Dichtigkeit der Sonne folgt einfach daraus, daß das Volumen der Sonne das der Erde 1¼ Mill. mal, die Masse der Sonne aber die Erdmasse nur 340000 mal übertrifft. Die Umdrehungszeit der Sonne ergibt sich aus der Beobachtung der Sonnenflecken; diese gehören zu der Beschreibung der Sonne.

Beschreibung der Sonne. Die Sonne, die Quelle aller Kraft auf Erden (36.), strahlt jährlich 3000 Quintillionen Calorien aus, eine Wärmemenge, welche einen 36^m dicken Eishimmel vom Radius der Sonnenentfernung zu schmelzen vermöchte (360.); hieraus folgt schon, daß auf der Sonne eine überaus hohe Temperatur herrschen muß. Da außerdem die Sonne ein Absorptionsspectrum hat, so ist sie nach den Gesetzen der Spectralanalyse ein weißglühender flüssiger Körper, der von einer Gashülle umgeben ist. Aus der Beschaffenheit der dunkeln Spectrallinien folgt, daß in dieser Gashülle Wasserstoff und Eisendampf die Hauptgemengtheile bilden, daß aber noch eine größere Menge anderer Körper, welche wir auf Erden kaum flüssig kennen, in Gasform der Sonnenhülle angehören. Hieraus ergibt sich für die Sonne eine Temperatur von vielen Tausenden von Graden, (nach Zöllner 100000°), welche sich (nach Helmholtz) durch Zusammenziehung der Sonne und (nach Mayer) durch Einsturz von Asteroiden noch in unübersehbare Zeiten zu erhalten fähig ist. Die Atmosphäre der Sonne muß kühler sein als der Sonnenkern und muß mit wachsender Entfernung von demselben an Temperatur abnehmen, weil im Weltraume, der die Sonne umgibt, eine Kälte von wenigstens 100° herrscht; hierdurch wird Veranlassung zu chemischen Verbindungen, die nach Devilles Dissociationstheorie in der heißen Tiefe nicht möglich sind, und zu Condensationen geboten, wodurch Sonnenwolken entstehen, die uns als dunkle S o n n e n f l e c k e n erscheinen. In der Nähe der Flecken, wie auch in anderen Gegenden der Sonnenscheibe tauchen häufig hellere Stellen auf, die man S o n n e n f a c k e l n nennt, während am Rande rothglühende Gassäulen, die P r o t u b e r a n z e n, oft viele Tausende von Meilen in die Höhe schießen, die wohl mit den Sonnenfackeln identisch sind. Die Zahl der Sonnenflecken erreicht alle 11 Jahre ein Maximum und sinkt in der Zwischenzeit zu einem Minimum herab (Schwabe 1838); dieselbe Periode macht sich auch geltend in der Mächtigkeit der Lichtentwickelung, der Sonnenfackeln (Weber in Peckeloh 1868), sowie merkwürdigerweise in der täglichen Variation der Magnetnadel (Lamont 1857), in der Intensität des Erdmagnetismus (Sabine 1852) und in der Häufigkeit der Nordlichter (Wolf 1862); sie kommt an Länge dem Jahre des Jupiter gleich.

Die S o n n e n f l e c k e n wurden 1611 von Fabricius entdeckt. Sie erscheinen als verhältnißmäßig dunkle, mehr braune als schwarze Stellen auf der leuchtenden Sonnenscheibe, an Form mannigfaltig, rund, länglich, gezackt, zerrissen, durch ein gewöhnliches Fernrohr scharf begrenzt, durch ein sehr gutes mit verwaschenen Grenzen, an Größe sehr verschieden, von 30000 M. Durchmesser bis zu verschwindender Kleinheit, die größten am seltensten, die kleinsten oder Sonnenporen in unzähliger Menge. Die größeren Flecken finden sich hauptsächlich in 10 bis 40° Breite, in den sogenannten Fleckenzonen, seltener am Aequator, fast gar nicht an den Polen. Während die blassen Sonnenporen sich rasch verändern und verschwinden, haben die größeren Flecken einen längeren Bestand, ziehen während dessen von Osten nach Westen über die Sonnenscheibe in ca. 13 Tagen hin und tauchen nach abermals 13 T. wieder am östlichen Rande auf, woraus schon die ersten Beobachter eine Rotation der Sonne in 25 T. schlossen. Schwabe beobachtete 1840 einen

Flecken während 8 Umläufen, und sah 1861—62 eine Fleckengruppe 22 mal wiederkehren. Die größeren Flecken haben häufig einen dunkleren Kern, der von einem weniger dunkeln Hofe, der Penumbra, umgeben ist, an dessen Grenzen zahlreiche Sonnenfackeln bemerkt werden. Am östlichen Sonnenrande, wo die Flecken lang und schmal in die meridianale Richtung gezogen auftauchen, ist der nachfolgende Hoftheil breiter als der vorausgehende, in der Mitte der Sonnenscheibe, wo die Flecken am breitesten erscheinen, haben beide Hofseiten eine mehr gleiche Ausdehnung, während am westlichen Rande der vorausgehende Hoftheil größer ist. Daraus ergab sich die Herschel-Wilson'sche Hypothese über das Wesen der Sonne; nach dieser sollte die Sonne einen dunkeln Kern, auf diesem eine graue Wolkenhülle und um diese eine mächtige Lichthülle, die Photosphäre besitzen; die Sonnenflecken dachte man sich als trichterförmige Oeffnungen in den beiden Hüllen, durch welche man auf eine Stelle des dunkeln Sonnenkernes sehe, woraus sich der Fleckenkern bilde, während der Hof durch den blosgelegten Theil der Wolkenhülle entstehe. Gegen diese Ansicht, welche jetzt noch viele Anhänger zählt, führte Kirchhoff (1860) zunächst das physikalische Bedenken auf, daß eine solche Photosphäre vermöge ihrer gewaltig erwärmenden Kraft jede Wolkenhülle und jeden dunkeln Kern in Gluth versetzen müsse; noch weniger aber entspricht sie den Gesetzen der Spectralanalyse. Nach diesen kann ein Absorptionsspectrum nur entstehen durch einen glühenden von einer Dampfhülle umgebenen Körper; folglich muß die Sonne einen glühenden statt eines dunkeln Kernes und eine Dampfatmosphäre haben, deren Bestandtheile aus den Fraunhofer'schen Linien zu erkennen sind. Die Sonnenflecken sind nach dieser Ansicht Sonnenwolken, welche durch Abkühlung von außen entstehen; in den Raum über einer solchen Wolke kann die Sonnenhitze nur in beschränkterem Maße gelangen, weßhalb sich über der ersten eine zweite größere und dünnere Wolke bilden muß, welche die erwähnten Hoferscheinungen ausreichend erklärt; diese Ansicht wird dadurch gestützt, daß nach Huggins und Secchi die Flecken genau dasselbe Spectrum wie die Sonnenfläche, nur mit breiteren Linien, haben, und daß Secchi auf das Vorhandensein von Wasserdampf bei den Flecken schließt, sowie auch durch die lebhafte Veränderlichkeit der meisten Flecken und die Eigenbewegungen derselben, welche ähnlichen Gesetzen wie die irdischen Winde zu gehorchen scheinen. Die Flecken in der Nähe des Aequators brauchen nur 24, die entfernteren 26 Tage für ihren Umlauf; die ersteren befinden sich in einem Westwinde, die letzteren in einem Ostwinde; außerdem wandert die ganze Fleckenbildung in 11 Jahren von den Polen zum Aequator gleichzeitig mit der Fackelentwickelung. Hiermit hängt die Fleckenperiode zusammen; die Zahl der Flecken ändert sich im Laufe der Jahre und erreicht alle 11 Jahre ein Maximum und nicht ganz in der Mitte dieses Zeitraumes ein Minimum; so fand Schwabe 1843 nur 34 Fleckengruppen und 149 fleckenfreie Tage, 1848 dagegen 400 Flecken und nicht einen freien Tag. Wolf in Zürich hat die Periode für fast 200 Jahre nachgewiesen und die Schwankungen derselben untersucht.

Die Protuberanzen sah man anfänglich nur als berg- und wolkenartige, rosenfarbige Hervorragungen bei Sonnenfinsternissen; spectralanalytisch untersucht wurden sie zuerst bei der großen indisch-arabischen Sonnenfinsterniß vom 18. Aug. 1868 und ergaben sich hierbei als glühende Wasserstoffsäulen, da man die hauptsächlichsten Linien des Wasserstoffs, Hα, Hβ und Hγ in ihrem Spectrum wahrnahm; damals gelang es indeß Janssen auch, dieses Spectrum bei gewöhnlichem Sonnenscheine zu sehen nach einer Methode, die kurz vorher Lockyer vorgeschlagen hatte. Wenn man nämlich im Spektroskop eine größere Anzahl stark brechender Prismen anbringt, so wird das continuirliche Sonnenspectrum selbst so vergrößert, daß die einzelnen Theile desselben ihre blendende Kraft verlieren; wird daher der Spalt des Apparates senkrecht den Sonnenrand durchschneidend gestellt, so liefert der auf die Sonnenscheibe gerichtete Theil desselben ein schwaches Sonnenspectrum und der andere das Linienspectrum der jenseits des Sonnenrandes etwa vorhandenen glühenden Gase. Durch Anwendung dieser Methode fand Secchi, daß rings um die Sonne herum eine Hülle von glühendem Wasserstoff vorhanden ist, die in der Fleckenregion fast die Höhe von 1′ = 6000 M. erreicht, in den übrigen aber nur 1000 M. ca. hoch ist und von Lockyer Chromosphäre genannt wurde. Schiebt man das Spectroskop rasch hin und her und faßt eine von den Wasserstofflinien z. B. die rothe Hα ins Auge, so sieht man wegen der Dauer des Lichteindruckes die Grenzen der Chromosphäre, da die rothe Linie immer nur bis zu dieser Grenze vorhanden ist, und übersieht ebenso die Gestalt einer Protuberanz, wenn das Spektroskop auf eine solche gerichtet ist. Dasselbe Ziel erreichte Huggins durch Einfügung eines Rubinglases in den Apparat, weil durch dieses alle übrigen Strahlen außer denen von Hα absorbirt werden; er suchte eine Stelle des Sonnenrandes, wo sich diese Linie zeigte, und öffnete dann den Spalt weit, wodurch dieselbe sich verbreiterte bis zur Gestalt der Protuberanz. Statt des Rubins wandte Zöllner zur Abschwächung des Nebenlichtes eine größere Prismenzahl an und das weite Oeffnen des Spaltes; da gelang es ihm, die Protuberanzen bei vollem Sonnenscheine in ihrer ganzen Gestalt, Größe und

Wandelbarkeit zu erkennen. So hat man denn durch die Beobachtungen zahlreicher Forscher, hauptsächlich von Lockyer und Zöllner erfahren, daß die Protuberanzen glühende Wasserstoff-eruptionen sind, die bis zu vielen Tausenden von M. in den verschiedensten und wandelbarsten Gestalten aus der Chromosphäre in die Höhe schießen, zerreißen, verzweigen, sich verdünnen, von Stürmen hin und her gepeitscht werden und sich in die Atmosphäre verlieren. Anfänglich hatte man nur die Linien des H in denselben und der Chromosphäre wahrgenommen; bei der Anwendung besserer Apparate bemerkte man auch die Linien von Mg und Na, jedoch kürzer als die H-Streifen, woraus man schloß, daß die Dämpfe jener Stoffe sich vorwiegend in den tieferen Schichten der Chromosphäre aufhielten. Als Young ein hoch gelegenes Observatorium mit reiner Luft benutzte, fand er immer mehr Linien, so daß schon 1872 die Zahl derselben auf 273 gestiegen war; die Chromosphäre ist daher ein complicirtes Dampfgemenge. Ob die Umkehrung der Fraunhofer'schen Linien schon in der Chromosphäre stattfinde, kann hieraus noch nicht entschieden geschlossen werden; sie könnte auch noch in der übrigen Atmosphäre der Sonne geschehen. Von einer solchen sieht man bei gewöhnlichem Sonnenscheine wegen des blendenden Glanzes der Sonne nichts; bei totalen Sonnenfinsternissen aber beobachtete man schon seit alter Zeit um die dunkle Mondscheibe herum außer den Protuberanzen einen hellen Lichtkranz, die Corona. Dieselbe enthält polarisirtes Licht, leuchtet also durch das von ihr reflectirte Sonnenlicht; die Spectraluntersuchung zeigt jedoch auch das Selbstleuchten derselben an, da die meisten Untersuchungen der letzten Jahre eine grüne Linie, zwischen D und E gelegen, für dieselbe ergaben, dieselbe welche auch im Sp. des Nord- und des Zodiakallichtes gefunden wurde und deren Bedeutung man bis jetzt nicht kennt; sicher aber ist die Corona der obere Theil der Sonnenatmosphäre. Wir sind indeß noch weit davon entfernt, die sämmtlichen Flecken- und Fackelerscheinungen in ihrem Zusammenhange mit dem Erdmagnetismus und den Nordlichtern zu durchschauen; in meiner Schrift „die Sonne" (1869) ist der Versuch gemacht, diesen Zusammenhang zu entwickeln; hiernach entständen die Flecken in einer Schicht, welche kühl genug ist, um chemische Verbindungen zu erlauben, dadurch, daß die Protuberanzen Eisendampf und Wasserstoff in dieselbe bringen, welche sich mit dem O dieser Schicht zu Eisenoxydhydrat verbinden und so Rostwolken, Sonnenflecken, erzeugen. Da die Rosttheilchen schwerer als Gase und Dämpfe sind, so muß die Rostwolke in das Innere der Sonne versinken und sich durch seitliches Einströmen der Dämpfe in den verdünnten Wirbelraum immer neu bilden; die eingestürzte Masse aber wird durch die Hitze des Sonnenkörpers zersetzt und durch den gewaltigen Auftrieb desselben hoch emporgeschleudert, wodurch die hohen Protuberanzen entstehen. Die ungeheuren herabstürzenden Eisenmassen der Rostwolken müssen auf den Erdmagnetismus und dadurch auf die Nordlichter wirken; die Periodicität aller dieser Erscheinungen wird aus der Sonnennähe und Sonnenferne des Jupiter abgeleitet.

Die scheinbaren Bewegungen der Sonne und die Zeit. Vermöge der täglichen Rotation der Erde um sich selbst von Westen nach Osten hat die Sonne wie alle Gestirne eine scheinbare tägliche Bewegung von Osten nach Westen um die Erde; diese bringt den Unterschied von Tag und Nacht hervor (Sterntag, wahrer Sonnentag, mittlerer Sonnentag s. 14.). Vermöge der jährlichen Revolution der Erde von Westen nach Osten um die Sonne hat diese eine scheinbare, jährliche Bewegung von Westen nach Osten um die Erde, welche den Unterschied der Zonen, Klimate, Jahreszeiten und Tageslängen bedingt. Die scheinbare Bahn der Sonne im Thierkreise, die Projection der Erdbahn auf die Himmelskugel ist die Ekliptik, ihre Ebene, die mit der Ebene der Erdbahn zusammenfällt, macht mit dem Himmelsäquator einen Winkel von $23^1/_2{}^0$, den man die Schiefe der Ekliptik nennt, und die beiden Punkte, in denen sie den Aequator durchschneidet, sind der Frühlingspunkt und der Herbstpunkt. Die Zeit, in welcher die Sonne 360^0 zurücklegt, also wieder zu denselben Sternen des Himmels zurückkehrt, nennt man das siderische Jahr; seine Länge ist 365,25637 mittlere Sonnentage oder 365 T. 6 St. 9 Min. 10,7496 Sec. Da der Frühlingspunkt wegen der Präcession (148.) der Sonne von Ost nach West jährlich um 50″ entgegenrückt, so ist die Sonne schon früher im Frühlingspunkte als am Ende ihrer Drehung; die Zeit zwischen zwei Durchgängen der Sonne durch den Frühlingspunkt ist das tropische Jahr = 365,24222 T. = 365 T. 5 St. 48 M. 46,8 Sec.; dasselbe ist die Grundlage des bürgerlichen Jahres, da von ihm die Wiederkehr der Jahreszeiten abhängt.

565

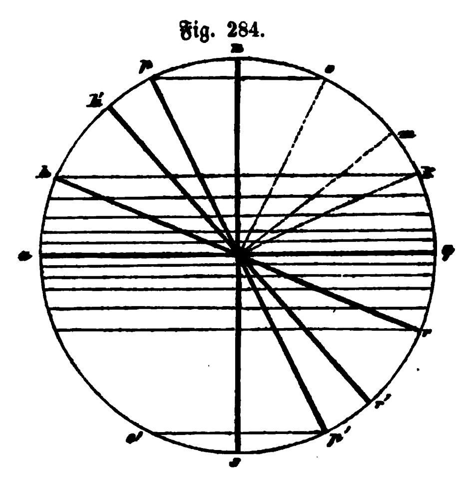
Wegen der großen Entfernung der Sonne von der Erde haben alle Erdpunkte Tag, welche von Linien getroffen werden, die parallel zur Verbindungslinie der Mittelpunkte von Erde und Sonne gezogen sind; die Parallelen, welche hierbei die Erde berühren, bilden die Grenze zwischen der beleuchteten Tagesseite und der dunkeln Nachtseite; da diese Grenze ein größter Kreis ist, so hat die eine Hälfte der Erde Tag, die andere Nacht. Dieser Kreis, die Lichtgrenze, steht auf der Verbindungslinie der beiden Centra senkrecht und enthält die sämmtlichen Punkte, für welche die Sonne auf- und untergeht; er geht in 24 St. um die ganze Erde von Osten nach Westen, langt daher für je 15° weiter westlich gelegene Orte um 1 St. später an, weßhalb Auf- und Untergang der Sonne für je 15° weiter westlich gelegene Orte 1 St. später stattfinden; dasselbe gilt für den wahren Mittag; diesen haben alle Orte gleichzeitig, welche auf dem Meridian liegen, der durch den Punkt geht, in welchem die Verbindungslinie der Centra die Erdoberfläche trifft, weil dieser Meridian auf der Lichtgrenze senkrecht steht und daher die beleuchtete Kugelhälfte halbirt; für jenen Schnittpunkt fallen die Strahlen um Mittag senkrecht auf die Erdoberfläche, weil die Sonne in seinem Zenith steht.

Da die jährliche Sonnenbahn mit dem Aequator einen Winkel von 23½° macht, und da die Sonne sich jeden Tag nur parallel zum Aequator dreht, so entfernt sie sich niemals weit vom Aequator; ihre Strahlen fallen daher immer nahezu senkrecht auf die äquatorialen Gegenden, schiefer auf die Mittelgegenden zwischen Aequator und Polen und sehr schief auf die polaren Gegenden; hieraus folgt der Unterschied der Zonen; denn die Wirkung der Sonnenstrahlen ist proportional dem Sinus des Neigungswinkels, nimmt also nach den Polen zu ab. *Die äquatoriale Lage der Ekliptik ist also die Ursache des Unterschiedes der Zonen.* Von der jährlichen Sonnenbahn liegt die eine Hälfte südlich, die andere nördlich vom Aequator; auf der Seite, wo sich die Sonne von Süden nach Norden bewegt, durchschneidet sie am 21. März den Aequator. An diesem Tage ist ihr Tageskreis der Aequator; da dieser von jedem Horizonte halbirt wird, so ist die Sonne 12 St. über und 12 St. unter dem Horizont, Tag und Nacht sind gleich lang. Nach dieser Zeit erhebt sich die Sonne nach Norden, ihre Strahlen fallen mehr senkrecht auf die nördlichen Gegenden, es wird für diese Frühling und Sommer; daher heißt jener Punkt der Frühlingspunkt, und die Stellung der Sonne in demselben das *Frühlingsäquinoctium*. Nachdem nun die Sonne auf ihrer jährlichen Bahn am 21. Juni die nördlichste Stelle erreicht hat, biegt sie wieder um nach Süden und erreicht am 23. Sept. abermals den Aequator, durchschneidet denselben im Herbstpunkte, befindet sich im *Herbstäquinoctium*. In der ganzen Zeit vom 21. März bis 23. Sept. steht die Sonne nördlich vom Aeq. und erhebt sich bis über ¼ der Himmelshöhe nach dem Nordpole zu; ihre Strahlen fallen daher auf die ganze nördliche Erdhälfte viel weniger schief als auf die südliche, die nördliche Erdhälfte hat Sommer, die südliche Winter; in der Zeit vom 23. Sept. bis 21. März steht dagegen die Sonne südlich vom Aeq. und entfernt sich bis zum 21. Dezember um 23½° nach Süden von demselben; ihre Strahlen fallen daher auf die nördliche Erdhälfte viel schiefer als auf die südliche, die nördliche Erdhälfte hat Winter, die südliche Sommer. *Die Schiefe der Ekliptik ist also die Ursache des Unterschiedes der Jahreszeiten.* Wo zwei Kreise sich schneiden, weichen die Richtungen der einzelnen Elemente beider Kreise am stärksten von einander ab; an den Stellen aber, die am weitesten von den Schnittpunkten entfernt sind, sind diese Elemente einander fast parallel. Zur Zeit der Aequinoctien bewegt sich daher die Sonne per Tag merklich rasch zum und vom Aequator; in den Zeiten der höchsten und tiefsten Stellung dagegen entfernt und nähert sie sich demselben während mehrerer Tage kaum merklich; daher heißt die Sonnenstellung vom 21. Juni Sommersonnenstillstand oder *Sommersolstitium* und die vom 21. Dez. *Wintersolstitium*. Indessen ist die tägliche Voranbewegung der Sonne in ihrer jährlichen Bahn gegen den Tageskreis selbst gering, so daß man die tägliche Bewegung als einen Parallelkreis des Himmels auffassen kann; die Sonne beschreibt also jährlich 365 Parallelkreise; der nördlichste heißt *Wendekreis des Krebses*, der südlichste *Wendekreis des Steinbocks*, weil in der Zeit nach vollbrachter Beschreibung dieser Kreise die Sonne sich nicht mehr weiter vom Aeq. entfernt, sondern sich zu demselben zurück wendet, und weil sie dabei in den betreffenden Sternbildern steht.

Wie der Aeq. auf seinem Hor. senkrecht steht, so stehen auch sämmtliche Sonnenkreise auf dem Hor. eines Aequatorpunktes senkrecht, und haben ihre Mittelpunkte wie der Aeq. auf demselben, werden also von demselben halbirt; für den Aeq. ist daher immer Tag und Nacht gleich. Für andere Orte sind nur am 21. März und 23. Sept. Tag und Nacht gleich, weil nur der Aeq. von jedem anderen Hor. halbirt wird, während jeder andere Tageskreis von einem gegen den Aeq. schiefen Hor. in ungleiche Tag- und Nachtzeiten getheilt wird. Die Tageskreise nördlich vom Aeq. fallen um so mehr über den Hor., je weniger der Hor. auf dem Aeq. senkrecht steht, je weiter also der betreffende Ort nach

Norden liegt, und je nördlicher die Tageskreise liegen; der Tag wird also um so länger, je weiter nördlich die Orte liegen, und je näher die Sonne dem Sommersolstitium kommt; je weiter nördlich aber ein Ort liegt, um so größere Theile der südlichen Tageskreise fallen unter den Hor., und zwar größere für südlichere; die Wintertage sind also um so kürzer, je nördlicher die Orte liegen und je näher die Sonne dem Wintersolstitium kommt. Für einen Punkt, der $23^1/_2{}^0$ vom Nordpole entfernt ist, also für einen Punkt des Polarkreises, weicht der Hor. $23^1/_2{}^0$ vom Aeq. ab, berührt also mit seinem nördlichen Ende den Wendekreis des Krebses und mit seinem südlichen Ende den Wendekreis des Steinbocks; der erste liegt ganz über, der letzte ganz unter dem Hor.; der nördliche Polarkreis hat am 21. Juni 24 St. Tag und am 21. Dez. 24 St. Nacht. Für den Nordpol fällt der Hor. in den Aeq., sämmtliche nördliche Tageskreise liegen daher über, sämmtliche südliche Tageskreise unter dem Hor.; der Nordpol hat also im Sommer 1/2 Jahr Tag, im Winter 1/2 Jahr Nacht. Die Punkte zwischen dem Nordpole und dem Polarkreise haben eine längste Nacht zwischen 1/4 Jahr und 24 St., und zwar kommt sie der ersteren um so näher, je näher der Ort am Pole liegt. Durch einen Blick auf Fig. 284, die man sich für die einzelnen Fälle nachzeichnet, wird der Unterschied der Tageslängen deutlicher; aq ist der Aeq., die ihm parallelen Linien sind die Tageskreise; aq ist auch der Hor. der Pole n und s, hr der Hor. des nördlichen Polarkreises po, h'r' der eines Punktes m der gemäßigten Zone z. B. Mainz, pp' der des nördlichen Wendekreises hk, ns der des Aeq. aq. Durch diese Horizonte werden immer die Tagesparallelen in 2 Theile getheilt, aus deren Größe leicht der Unterschied zwischen Tag- und Nachtlänge erlesen wird.

Fig. 284.



Sommer und Winter sind nicht genau einander gleich; der Sommer ist für die nördliche Erdhälfte nahezu 8 Tage länger als der Winter. Dies rührt daher, daß die Erde im Sommer in ihrem Aphel ist und sich daher im Sommer langsamer bewegt als im Winter (nach dem zweiten Keppler'schen Gesetze); daher braucht die Sonne zur Zurücklegung von 180° der Ekliptik im Sommer mehr Zeit als im Winter. — Die Zonen pflegt man durch die Wendekreise und Polarkreise zu begrenzen; die Gegend zwischen den Wendekreisen oder Tropen bildet die heiße Zone oder tropische Gegend, die Erdoberflächentheile zwischen den Tropen und den Polarkreisen die gemäßigte Zone und die durch die Polarkreise abgeschnittenen Calotten die kalten Zonen.

4. Die Planeten.

Gemeinsame Eigenschaften. Um die Sonne drehen sich 8 große Planeten, Mercur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, und zwischen Mars und Jupiter mehr als 100 (bis Ende 1877 entdeckt 179) kleine Planeten oder Planetoiden. Ihre drehende Bewegung um die Sonne entsteht dadurch, daß sie eine gewisse fortschreitende Bewegung, eine lebendige Kraft besitzen, vermöge welcher sie nach dem Gesetze der Trägheit in gerader Linie ins Unendliche gehen müßten, wenn sie nicht durch die Anziehung der Sonne stetig von dieser geraden Linie abgelenkt und dadurch in eine geschlossene Bahn gedrängt würden. Diese Anziehung erfolgt nach Newtons Gravitationsgesetze in geradem Verhältnisse zu den Massen und in umgekehrtem Verhältnisse zu den Quadraten der Entfernungen. Aus diesem Grundgesetze läßt sich schließen, daß die Planetenbewegung nach den Keppler'schen Gesetzen geschieht: 1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkte die Sonne steht. 2. Die Radienvectoren beschreiben in gleichen 566

Zeiten gleiche Flächenräume. 3. Die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Cuben der halben großen Bahnachsen (Näheres 141.—150.). Vermöge der elliptischen Bahn eines Planeten ist die Entfernung desselben von der Sonne verschieden; der Punkt der kleinsten Entfernung von der Sonne wird Perihel, der der größten Aphel genannt; die Verbindungslinie beider Punkte ist die große Achse der Ellipse und heißt auch Apsidenlinie. Verlängert man dieselbe über das Perihel bis an die Himmelskugel und legt durch den Endpunkt einen Breitenkreis, so ist der Bogenabstand desselben vom Frühlingspunkte nach Osten zu gemessen die Länge des Perihels. Die Planetenbahnen fallen nicht alle in eine Ebene, weichen aber doch nicht stark von der Ebene der Erdbahn, von der Ekliptik ab; der Winkel, den die Ebene einer Bahn mit der Ekliptik bildet, heißt die Neigung der Planetenbahn. Die Neigungen der Planetenbahnen liegen zwischen 1° und 7°, die der Planetoidenbahnen zwischen 1° und 34°. Jede Planetenbahn schneidet die Ekliptik in zwei Punkten, Knoten genannt, deren Verbindungslinie Knotenlinie heißt; der Knoten, durch welchen der Planet von Süden nach Norden geht, heißt der aufsteigende Knoten, und dessen Bogenabstand vom Frühlingspunkte nach Osten zu gemessen die Länge des aufsteigenden Knotens. Den Abstand des Brennpunktes der Ellipse vom Mittelpunkte nennt man die lineare Excentricität, den Quotienten derselben durch die halbe große Achse kurzweg Excentricität. Die Exc. der Planetenbahnen liegen zwischen 0,2 und 0,007, die der Planetoidenbahnen gehen bis 1/4. Alle Größen, die man auffinden muß, um die Bahn eines Planeten vollständig zu kennen, nennt man die Elemente der Planetenbahn; diese sind: 1. Die halbe große Achse der Bahn. 2. Die Excentricität. 3. Die Länge des Perihels. 4. Die Länge des aufsteigenden Knotens. 5. Die Neigung. 6. Die siderische Umlaufzeit oder Umlaufzeit kurzweg, d. i. die Zeit, in welcher der Planet von der Sonne aus gesehen 360° beschrieben hat, also wieder in dieselbe Stellung gegen dieselben Fixsterne zurückkehrt. 7. Die mittlere Länge des Planeten zur Zeit des Perihels, welche man Epoche nennt. Die Berechnung wird nämlich erleichtert durch Einführung eines sogenannten mittleren Planeten, der in der Umlaufzeit des wirklichen Planeten aber mit gleichmäßiger Bewegung die Bahn eines Kreises durchläuft, dessen Radius gleich der halben großen Achse der wirklichen Bahn ist; den Bogenabstand desselben vom Frühlingspunkte in der Richtung der Ekliptik gemessen zu der Zeit, wo der wirkliche Planet im Perihel steht, nennt man die mittlere Länge. Diese Elemente sind heliocentrisch, d. h. die Sonne ist der Mittelpunkt der Winkelmessungen; sie müssen aus den geocentrischen Elementen, die theilweise selbst beobachtet werden können, weil bei ihnen die Erde den Mittelpunkt der Messung bildet, abgeleitet werden, was nach einer von Gauß angegebenen Methode aus 3 genauen Beobachtungen geschehen kann. Von der Erde aus haben die Planetenbahnen verwickelte Formen; ihre Bewegung ist nicht blos sehr ungleichmäßig (die erste Ungleichheit der Alten), sondern der Planet steht auch manchmal still, wird stationär, ja schlägt sogar statt der rechtläufigen Bewegung von Westen nach Osten manchmal die rückläufige von Osten nach Westen ein und bildet dadurch gezackte und verschlungene Bahnen (die zweite Ungleichheit der Alten); auch erscheint ein Planet an Größe sehr verschieden. In der Stellung zur Erde unterscheidet man die inneren oder unteren Planeten, Mercur und Venus, welche der Sonne näher sind als die Erde, von den übrigen oder äußeren oder oberen. Steht ein äußerer Planet in einer Richtung mit Erde und Sonne, aber auf der entgegengesetzten Seite wie die Sonne, so nennt man diese Stellung Opposition; steht er aber mit der Sonne auf derselben Seite der Erde, so heißt

diese Stellung Conjunction; die inneren Planeten haben keine Opposition, aber 2 Conjunctionen; die Stellung zwischen Erde und Sonne nennt man die untere, die jenseits der Sonne die obere Conjunction, diese Stellungen zusammen auch Syzygien; die Stellungen aber, in welchen die Verbindungslinien der Erde und des Planeten mit der Sonne rechte Winkel einschließen, Quadraturen. Die Zeit, welche zwischen 2 gleichen Stellungen eines Planeten gegen Sonne und Erde verfließt, z. B. die Zeit zwischen 2 Oppositionen, nennt man die synodische Umlaufzeit des Planeten; außer dieser und der eigentlichen oder siderischen Umlaufzeit spricht man noch von der tropischen Umlaufzeit, d. i. der Zeit, welche zwischen 2 gleichen Stellungen zum Frühlingspunkte liegt. Die tropische ist wegen der Präcession um einen geringen Betrag kleiner als die siderische; die synodische bei den 4 ersten Pl. größer, bei den 4 letzten kleiner als jene. — Die Umlaufzeit ist um so größer, je weiter die Planeten entfernt sind, nicht blos weil die entfernteren eine größere Bahn zu durchlaufen haben, sondern auch weil ihre Geschwindigkeit eine kleinere ist; denn für rein kreisförmige Bahnen würden sich nach dem 3. Keppler'schen Gesetze die Geschwindigkeiten umgekehrt wie die Wurzeln der Entfernungen verhalten, und da die Planetenbahnen nur sehr wenig von der Kreisform abweichen, so gilt dies Gesetz auch sehr nahe für die Planeten. Wären die Geschwindigkeiten der Planeten größer, so würden ihre Bahnen gestrecktere Ellipsen, Parabeln und Hyperbeln werden. Die Umlaufzeiten der Planeten liegen zwischen $1/4$ und 164 Jahren, ihre Geschwindigkeiten zwischen 6 und $2/3$ Meilen. Die Entfernungen der Planeten von der Sonne befolgen kein aus den inneren Kräften ableitbares Gesetz, stehen aber doch in einer gewissen Symmetrie, die gewöhnlich als Titius'sches Gesetz angeführt wird. Die Entfernung des Mercur ist nämlich $0 . 6 + 8$ Mill. M., die der Venus $1 . 6 + 8$, der Erde $2 . 6 + 8$, des Mars $4 . 6 + 8$, der Planetoidengruppe durchschnittlich $8 . 6 + 8$ Mill. M. u. s. w. Man findet dieselbe nach dem 3. Keppler'schen Gesetze oder auch durch Beobachtung der Horizontalparallaxe. Die Größe der Planeten liegt zwischen 600 und 20 000 M. Durchmesser; man findet dieselbe trigonometrisch aus dem scheinbaren Durchmesser und der Entfernung. Die Masse der Planeten ist im Verhältnisse zur Sonnenmasse gering. Alles was sich um die Sonne dreht, hat zusammen noch nicht $1/800$ der Sonnenmasse; die Masse des größten Planeten ist 300mal größer, die des kleinsten 12mal kleiner als die Erdmasse, woraus die Dichte des ersten $= 1/4$, des letzteren $= 1 1/2$ der Dichte der Erde folgt. Für Planeten mit Satelliten findet man die Masse des Planeten, indem man den Fall des Satelliten gegen den Planeten vergleicht mit dem auf gleiche Entfernung reducirten Falle der Erde gegen die Sonne; für Planeten ohne Satelliten muß man die Störungen zu Hülfe nehmen, welche ein Planet auf die Bahn eines anderen oder eines Kometen ausübt. Unter Störungen oder Perturbationen versteht man die Veränderungen, welche die Elemente einer Gestirnsbahn durch die Anziehung benachbarter Weltkörper erfahren; so werden durch das periodisch wiederkehrende Näherkommen zweier Planeten die Länge und die Sonnenentfernung derselben periodisch geändert; dies sind periodische Störungen. Da aber durch diese die Planetenbahnen gegen einander Veränderungen erfahren, so muß die Lage jeder Bahn verändert werden, und zwar innerhalb sehr großer Perioden, weil ein Cyclus gleicher Bahnveränderungen nur in langen Zeiten wiederkehrt. Es entstehen daher auch Aenderungen der Excentricität, der Neigung, der Lage der Apsidenlinie oder der Länge des Perihels, der Bahnachse u. s. w.; diese sehr kleinen und in sehr langen Zeiträumen erst wiederkehrenden Aenderungen werden säculare Störungen genannt. So nimmt die Excentricität der Erdbahn bis zum

Jahre 20 000 jedes Jahrhundert um 0,00904 ab und dann wieder zu; so nimmt die Neigung der Erdbahn, die Schiefe der Ekliptik, in unserem Jahrhundert um 0,47″ jedes Jahr ab; so nimmt die Länge des Perihels, welche 99° 30′ beträgt, jedes Jahr um 62″ zu; daher ist das anomalistische Jahr, die Zeit zwischen 2 Perihelstellungen, größer als das tropische Jahr, = 365, 25967 Tagen. Das Perihel der Erde, das gegenwärtig auf den 2. Januar fällt, rückt in 57 Jahren um 1° voran, also in 21 000 Jahren auf der ganzen Ekliptik herum, so daß in 10 500 Jahren die Sonnennähe der Erde im Sommer stattfindet.

Die scheinbaren Bahnen der Planeten mit ihren Ungleichmäßigkeiten, Stillständen, Rückgängen und Schleifen konnten nach den alten Systemen nur durch sehr gekünstelte Annahmen erklärt werden, ergeben sich aber aus dem Copernikanischen System höchst einfach als Folgen der Bewegung der Planeten und der Erde um die Sonne; von der Erde aus sehen wir einen Planeten nicht blos seine eigene westöstliche Bahn durchlaufen, weßhalb auch seine Hauptbewegung eine westöstliche ist, sondern wir sehen ihn auch eine scheinbare Bewegung, das Spiegelbild der Erdbahn, vollziehen, welche bald westöstlich, bald ostwestlich erscheinen kann und daher die eigene Bewegung des Planeten verstärken, aber auch aufheben und in die entgegengesetzte verwandeln kann. Denken wir uns nämlich einen äußeren Planeten ganz stillstehend zwischen der Erdbahn und der Himmelskugel, so scheint uns der Planet auf dieser Kugel fortzurücken, wenn wir uns ohne es zu empfinden, fortbewegen, und zwar nach entgegengesetzter Richtung. Ist in der Erdbahnhälfte, die dem Planeten zunächst liegt, die westöstliche Bewegung der Erde von links nach rechts gerichtet, so scheint der Planet sich am Himmel von rechts nach links zu bewegen; in der anderen Erdbahnhälfte hat aber dann die Erde eine Bewegung von rechts nach links, weßhalb in dieser Zeit der Planet sich von links nach rechts wenden muß. Diese scheinbare Bewegung eines Planeten mit der wirklichen verbunden erklärt alle Besonderheiten der scheinbaren Planetenbahnen; dem Studirenden ist zu empfehlen, durch einige einfache Zeichnungen der Sache näher zu treten. Es erklärt sich dann leicht, daß z. B. die Venus in ihrer Bahn 1847 durch die Schulter der Jungfrau nach der Spica ging, sich dann in einer Schleife nach der Schulter zurückbog und abermals an der Spica vorbeiging.

Unterschiede zwischen den Planeten und Planetoiden. 1. Die Planeten haben Durchmesser von 600 bis 20 000 M., die Planetoiden nur von 3—60 M. 2. Die Planeten sind ziemlich regelmäßige Kugeln, die Planetoiden von unregelmäßiger Form. 3. Die 8 Planeten sind auf einem Raume von 8 bis 650 Mill. M. zerstreut, die Planetoiden meist auf eine Zone zwischen 50 und 60 Mill. M. beschränkt. 4. Die 8 Planeten haben sehr kreisähnliche, die Planetoiden mehr gestreckte Bahnen; die Exc. der ersteren ist durchschnittlich viel kleiner als die der letzteren. 5. Die Ebenen der Planetenbahnen fallen sehr nahe mit der Ebene der Erdbahn zusammen, die Planetoidenbahnen sind theilweise ziemlich steil gegen dieselbe gestellt.

Unterschiede zwischen den 4 ersten und den 4 letzten Planeten, welche beide Gruppen durch die Planetoiden von einander getrennt sind. 1. Die 4 ersten haben durchschnittlich 10 mal kleinere Durchmesser als die 4 letzten, also 100 mal kleinere Oberflächen, 1000 mal kleinere Inhalte. 2. Die 4 ersten haben eine viel größere Dichtigkeit als die 4 letzten; z. B. die Dichtigkeit der Erde kommt fast der des Eisens gleich, die des Saturns erreicht nicht einmal die des Wassers. 3. Die 4 ersten haben kurze Umlaufzeiten von ¼ bis 2 Jahre, die 4 letzten große von 11 bis 165 J. 4. Die 4 ersten haben lange Tage von 24 St., die letzten kurze von ca. 10 St. 5. Die 4 ersten haben daher eine geringe, die 4 letzten eine starke Abplattung. 6. Die 4 ersten sind dunkel, die 4 letzten scheinen noch eigenes Licht zu haben. 7. Die 4 ersten sind arm an Satelliten, nur die Erde hat einen Mond und der Mars 2, die 4 letzten dagegen reich, Jupiter hat 4, Saturn 8 Monde und 3 Ringe, Uranus nach Herschel 6 Monde, Neptun 1 Mond.

567 1. Mercur. Bei seiner geringen mittleren Entfernung (8 Mill. M.) von der Sonne wird die Elongation d. h. der scheinbare Bogenabstand des Mercur von der Sonne nie größer als 29°; der Mercur steht immer nahe bei der Sonne, geht daher kurz vor derselben auf, oder gleich nach derselben unter, so daß selbst sein glänzendes Licht unsere starke nördliche Dämmerung nicht überstrahlen und den trüben Horizont nicht durchdringen kann, weßhalb der Planet bei uns nur selten, wohl aber in südlicheren Gegenden leichter gesehen wird. Seine größte Entfernung von der Sonne beträgt 9,3, die kleinste 6,2 M. M., so daß seine Exc. = 0,2, die größte aller Planetenbahnen ist. Mit dem Heliometer bestimmte Bessel den scheinbaren Durchmesser = 6,7″, woraus der Dm. des Mercur = 600 M. berechnet wird. Die Masse ergab sich 1841 aus der Störung des Encke'schen Kometen = $^1/_{12}$ der Erdmasse, woraus die Dichtigkeit = $1^1/_2$ der Dichte der Erde, also das sp. G.

= 9, gleich dem des Kupfers, und die Schwerkraft = 0,6 von der der Erde ist. In der oberen Conjunction wendet uns der Mercur seine beleuchtete Hälfte zu, erscheint daher als helle Kreisscheibe, in der unteren Conjunction wendet er uns die unbeleuchtete Hälfte zu, ist daher unsichtbar; in den Quadraturen können wir nur die Hälfte seiner beleuchteten Hälfte sehen, er erscheint daher als beleuchteter Halbkreis; zwischen unterer Conj. und Quadratur hat er Sichelform, zwischen Quadratur und oberer Conj. erscheint er größer wie ein Halbkreis. Der Mercur hat also Lichtwechsel oder Phasen, die mit der Stellung gegen Sonne und Erde, also in dem synodischen Jahre = 116 Tagen wiederkehren; das siderische Jahr beträgt nur 88 Tage, die Jahreszeiten sind also noch nicht 1 Monat lang; der Wechsel der Jahreszeiten und Zonen mag dort dem der Erde analog sein, da die Schiefe seiner Bahn 20° beträgt; doch ist die Wärme wegen der größeren Sonnennähe jedenfalls weit größer als die der Erde. Aus der Wiederkehr einer Abstumpfung an einem Horne der Mercursichel ergab sich die Rotationszeit oder der Tag = 24 St., und berechnete Schröter die Höhe der diese Abstumpfung verursachenden Berge zu 60000′. Da die Sichelgrenze verwaschen ist und die Sichel schmaler erscheint, als der Rechnung entspricht, da außerdem helle und dunkle, rasch wechselnde, nur von Wolken erzeugbare Flecken beobachtet wurden, so vermuthet man für den Mercur eine starke Atmosphäre. Neuere Untersuchungen, sowie das Spectrum des Mercur, machen die Existenz einer Atmosphäre zweifelhaft, ja nach Zöllners (1874) Forschungen über die Albedo, d. i. die lichtreflectirende Fähigkeit des Mercur stimmt die Oberfläche desselben mit der des Mondes und besitzt er keine Atmosphäre. Auch die Berghöhen und die Tageslänge werden bezweifelt. Wenn die untere Conjunction so nahe bei einem Knoten stattfindet, daß die Breite des Mercur kleiner als der scheinbare Sonnenradius ist, so steht der Mercur in gerader Linie zwischen uns und der Sonne, und erscheint dann als schwarzer kreisförmiger Fleck auf der leuchtenden Sonnenscheibe, eine Erscheinung, die man Durchgang oder Passage des Mercur nennt. Die nächsten Durchgänge sind 6. Mai 78, 9. Nov. 81; doch sind sie nicht mit blosem Auge merkbar. Aus seinen neuen Mercurtafeln hatte Leverrier geschlossen, daß die Länge des Perihels sich außer den übrigen Störungen noch um 38″ in 100 Jahren ändere, was auf die Existenz eines oder mehrerer intramercuriellen Planeten hindeute, wofür man schon den Namen Vulcan vorschlug. Allein Delaunay erklärte jene Abweichung als einen Ausfluß älterer ungenauer Beobachtung; außerdem müßten die fleißigen zahlreichen Sonnenbeobachter des letzten Jahrzehntes öftere Passagen dieses vermutheten Vulcans gesehen haben; endlich richtete man bei den letzten großen Sonnenfinsternissen alle Aufmerksamkeit auf die Sonnenumgebung, ohne einen solchen Planeten entdecken zu können; man ist daher geneigt, Delaunay Recht zu geben. Indeß beobachtete Weber in Peckeloh (1876) eine dunkle Scheibe auf der Sonne, wodurch Leverrier veranlaßt wurde, ähnliche Beobachtungen von 1802, 1839, 1849, 1859 und 1862 auf seinen „Vulcan" zu deuten. — Asten hat aus der Störung des Encke'schen Kometen (1848) die Mercursmasse = $^1/_{25}$ der Erdmasse berechnet, wonach sich dessen Dichte nur = $^3/_4$ der Erddichte, also gleich der des Schwerspaths ergeben würde.

2. Venus. Da die Venus durchschnittlich 14 Mill. M. von der Sonne entfernt ist, so ist ihre größte Digression nur 48°; sie geht bald nach der Sonne unter, ist Abendstern, oder nicht lange vor der Sonne auf, ist Morgenstern. Sie hat Lichtphasen wie der Mercur, hat aber weder in der oberen Conjunction, wo sie als vollbeleuchteter Kreis erscheint, noch in der größten Digression, wo sie als Halbkreis auftritt, ihre größte Lichtstärke, weil sie dann noch zu weit von uns entfernt ist, sondern erst 35 Tage vor oder nach der unteren Conjunction, obwohl sie dann nur Sichelform besitzt. Die größte Entf. von der Sonne und die kleinste sind nur wenig verschieden, weil die Exc., die kleinste von allen, nur 0,007 ist; um so größer ist aber der Unterschied der Entfernungen von der Erde, 5 und 35 Mill. M., woraus sich die besondere Zeit der größten Lichtstärke erklärt, die indeß nur alle 8 Jahre wiederkehrt, dann aber bei diesem herrlichen Gestirne eine solche Höhe erreicht, daß es sogar Schatten erzeugt und bei hellem Tage sichtbar ist. Aus dem scheinbaren Dm. 17,1″ hat man den wirklichen Dm. = 1650 M. gefunden; da die Masse = $^5/_6$ Erdmassen ist, so ist ihre Dichte auch sehr nahe der Erddichte gleich. Ebenso ist die Rotationszeit, der Tag, sehr nahe dem Erdentage gleich, nämlich 23 St. 20 M., was sowohl aus der Wiederkehr von Flecken, als auch aus einer Abstumpfung eines Sichelhornes gefunden wurde, woraus Schröter eine Gebirgshöhe von 100000′ berechnet hat. Aus der verwaschenen Sichelgrenze, sowie aus der, wenn auch langsamen, Veränderlichkeit von selten wahrzunehmenden hellen und dunkeln Flecken hat man die Existenz einer Atmosphäre geschlossen, die nach Mädler dichter als die der Erde ist. Nach Zöllner (1874) zeigt die starke Albedo und nach Vogel (1873) das dem Sonnenspectrum fast gleiche Venussp. darauf hin, daß die dichte Atmosph. der Venus so von Condensationsproducten erfüllt ist, daß schon von dieser das Sonnenlicht reflectirt wird; deßhalb erscheinen Vogel die Schlüsse Schröters

568

aber den Tag und die Achsenlage der Venus aus den Flecken zweifelhaft; die Tageslänge wird übrigens von den meisten Forschern auf 24 St. geschätzt. Mit der dichten Atmosphäre hängt vielleicht das phosphorische Licht zusammen, das manche Beobachter an dem unbeleuchteten Theile der Venus sahen, und das vielleicht unserem Nordlichte ähnlich ist. Manche schreiben das aschfarbige Venuslicht einem vermutheten Venusmonde zu, den Cassini im 17. und mehrere Beobachter des 18. Jahrhunderts gesehen haben wollen. Schorr stellte 1875 alle Beobachtungen und Gründe für einen Venusmond zusammen, zu denen er auch auf der Venus hinwandernde dunkle Flecken rechnete. Das siderische Jahr der Venus ist 225 Tage, das synodische 584 Tage lang; die Jahreszeiten sind dort länger als 50 Tage und müssen sehr verschieden sein, wenn Schröters Angabe, daß die Schiefe der Bahn 72° betrage, richtig ist. Die interessanteste Venuserscheinung sind die Durchgänge, welche geschehen, wenn die untere Conjunction so nahe am Knoten stattfindet, daß die Breite kleiner als der scheinbare Sonnenradius ist; diese Durchgänge geschehen in Perioden von 105½, 8, 121½, 8 Jahren; die letzten waren 1761, 1769, 8. Dez. 1874; die nächsten sind 6. Dez. 1882, 7. Juni 2004.

Die astronomischen Eigenschaften der Erde wurden in dem ersten Abschnitte dieser 10. Abtheilung betrachtet; den physikalischen Eigenschaften wird die 11. Abtheilung gewidmet sein.

569 3. Mars. Wegen seiner mittleren Entf. von 30 Mill. M., welche die der Erde um 10 M. M. übersteigt, kann sich dieser rothe Stern in Opposition, d. h. auf der der Sonne entgegengesetzten Seite der Erde befinden, also um Mitternacht durch den Meridian gehen; ebenso kann er nie dunkel oder als schmale Sichel oder Halbkreis erscheinen. Seine größte und kleinste Entf. von der Sonne sind sehr von der mittleren verschieden, weil seine Exc. = 1/11, 6mal größer als die der Erde ist, die größte nach dem Mercur und daher für Keppler geeignet zur Entdeckung seiner Gesetze; noch verschiedener aber sind seine Entfernungen von der Erde, liegen zwischen 7 und 54 M. M., weßhalb er uns sehr verschieden groß und leuchtend erscheint und im günstigsten Falle alle Sterne überstrahlt. Der Dm. des Planeten beträgt 900 M., sein Inhalt ist daher 1/7 von dem der Erde; seine Masse, die man aus der störenden Einwirkung auf die Erde geschlossen hat, = 1/8 der Erdmasse, und daher seine Dichte 0,8 der Erddichte. Wie bei Mercur und Venus ist auch bei diesem Planeten die Abplattung unmerklich; dies entspricht der langen Rotationsdauer von 24 St. 40 M., die man aus der Beobachtung der Marsflecken gefunden hat. Solcher Flecken gibt es helle, beständige, wahrscheinlich Land, Continente, sodann dunkle, wahrscheinlich Meere, welche durch Hunderte von M. lange Straßen verbunden sind und sich nur manchmal durch atmosphärische Trübungen etwas verändern, und endlich an den Polen 2 weiße, im Marssommer abnehmende, im Winter zunehmende Flecken, offenbar Schnee- oder Eiscontinente. Hieraus, sowie aus dem Abnehmen der Fleckendeutlichkeit nach dem Marsrande zu, aus der größeren Verwaschenheit der Flecken im Winter, sowie aus der Lichtschwächung von Fixsternen am Marsrande folgt die Existenz einer unserer Luft ziemlich gleichen Marsatmosphäre.

Im Sommer 1877 hatte der Mars die kleinste Entfernung in diesem Jahrhundert von der Erde = 7½ M. M., weßhalb er zu dieser Zeit mit seinem rothen Lichte alle Sterne überstrahlte; zugleich wurde durch diese geringe Entfernung die Entdeckung zweier Marsmonde möglich, die durch merkwürdige Eigenschaften von allen anderen Satelliten abweichen. Zunächst müssen ihre Durchmesser kleiner als 20 M. sein, weil sie sonst eher und öfter von der Erde aus hätten gesehen werden müssen; sodann sind sie nur 700 und 2600 M. von der Marsoberfläche entfernt, und endlich sind ihre Umlaufzeiten ganz abweichend kurz, nur 7½ und 30 Stunden. Hieraus und aus der Rotationszeit des Mars ergeben sich sonderbare Erscheinungen für diese Monde vom Mars aus gesehen: der erste Marsmond geht für die Marsbewohner im Westen auf und im Osten unter, und zwar jeden Marstag zweimal, wobei er mehrmals seine Phasen wechselt, also den Marsbewohnern als Uhr dienen kann. Der zweite Marsmond geht im Osten auf und im Westen unter und zwar alle 5 Marstage einmal, wobei er zwischen Auf- und Untergang alle Phasen zweimal wechselt. Die erste Beobachtung der Marsmonde geschah durch Asaph Hall am 11. Aug. 1877 in Washington.

570 4. Die Planetoiden. Schon Keppler hatte in dem „Hiatus" zwischen Mars und Jupiter Planeten vermuthet, und nach Aufstellung des Titius'schen Gesetzes mußte diese Vermuthung an Wahrscheinlichkeit gewinnen; doch entdeckten Piazzi in Palermo am 1. Januar 1801 die Ceres, und Olbers in Bremen 1802 die Pallas durch Zufall. Harding fand durch Vergleichung des Himmels mit seinen neu angefertigten Sternkarten 1804 die Juno, und da Olbers diese Planeten für Trümmer eines größeren hielt, so fand er durch fleißiges Suchen in der Nähe des Knotens der Bahnen 1807 die Vesta. Die Bahnen dieser Planeten berechnete Gauß nach einer neuen von ihm aufgestellten Methode, die in

dem berühmtesten astronomischen Werke der Neuzeit „Theoria motus corporum coelestium" enthalten ist. Als später immer genauere Sternkarten der äquatorialen Himmelsgegenden gezeichnet wurden, in welchen alle Sterne bis zur 11. Gr. Aufnahme fanden, konnte man mit Sicherheit einen neuen Planeten in jedem Sterne vermuthen, der an einer Stelle aufgefunden wurde, an welcher in den Karten keiner verzeichnet war. So begannen denn 1845 mit der Asträa (Hencke in Driesen) die Entdeckungen zahlreicher kleiner Weltkörper zwischen Mars und Jupiter, die man Planetoiden nannte, und deren Zahl Ende 1877 auf 179 gestiegen ist; 1852 wurden 8, 1861 10, 1868 12, 1875 gar 17 dieser kleinen Weltkörper aufgefunden. Die meisten fanden Luther in Bilk bei Düsseldorf 21 und Peters in Clinton in Nordamerika 26; dann folgen Watson in Ann Arbor in Nordamerika 20, Goldschmidt in Paris 14. Fleißige Entdecker der letzten Zeit sind Palisa in Pola, der in den letzten 3 Jahren 11 gefunden hat, und Paul und Prosper Henry, die mittels der neuen Pariser bis zur 13. Gr. gehenden Aequatorialkarte in den letzten 3 J. 9 entdeckt haben. Man gibt diesen kleinen Weltkörpern zwar auch Namen, bezeichnet sie aber mit der Ordnungsnummer der Entdeckung in einem kleinen Kreise, so die Ceres mit (1), den am 8. Februar 1878 von Palisa entdeckten Planetoid mit (183). Die Entfernungen liegen durchschnittlich zwischen 50 und 60 M. M.; doch nähert sich Phocäa bis 37 und entfernt sich Freja bis 23 M. M. Die Bahnen haben starke Excentricitäten, die der Pallas ist beinahe $^1/_2$; ebensostark sind die Neigungen, die der Pallas beinahe 35°, so daß die Bahnen weit über den Thierkreis hinausgehen; die Neigungen wachsen mit den Excentritäten so regelmäßig, daß d'Arrest den Zusammenhang durch eine Formel ausdrücken konnte; auch sind häufig 2 Planetoiden in Neigung und Exc. so verwandt, daß man sie als Paare ansehen kann, während bei anderen Gruppen die Knoten sehr nahe zusammen fallen und die Bahnen so verschlungen sind, daß man bei einer Darstellung derselben durch Ringe keine Bahn aus dem ganzen System nehmen könnte, ohne einen großen Theil der übrigen mitzunehmen. Die Größe der Plantoiden ist sehr unbedeutend; Hestia hat nur 3, Vesta 60 M. Dm.; die Form ist nie kreisscheibenartig, die Verschiedenheit der von verschiedenen Forschern angegebenen Durchmesser eines und desselben Planetoiden deutet vielmehr auf eine eckige Form. Aus all diesen Eigenthümlichkeiten hat man früher öfter geschlossen, daß die Planetoiden Trümmer eines durch eine Weltkatastrophe zerstörten Planeten seien, neigt sich aber jetzt zu der Annahme, daß sie bei der Bildung unseres Sonnensystems gleichzeitig von dem Centralkörper abgeschleudert sein dürften.

5. **Jupiter**, der größte Planet, ein heller, gelber Stern erster Größe, hat beinahe 20000 M. Dm., übertrifft also die Erde an Inhalt mehr als 1200mal; da aber seine aus den Störungen der Planetoiden gefundene Masse die Erdmasse nur 300mal übertrifft, so folgt, daß seine Dichte nur $^1/_4$ der Erddichte ist, also nicht viel die des Wassers übersteigt. Trotz dieser geringen Dichte besitzt er fast die 3fache Masse aller übrigen Planeten zusammen genommen und würde dieselben nach dem Verschwinden der Sonne um sich drehen. Seine Entf. von der Sonne beträgt im Mittel 104 M. M.; die Bahn weicht nur wenig vom Kreise ab, hat nur eine Exc. von 0,05, und eine ebenfalls geringe Neigung. Seine Umlaufzeit beträgt bei einer Geschw. von 1,8 M. nahezu 12 Jahre; die Jahreszeiten dauern also 3 Jahre, sind aber nur wenig verschieden, da die Neigung seines Aeq. gegen seine Bahn nur 3° beträgt; um so rascher wechseln die Tageszeiten, da seine Rotation in 10 St. stattfindet. Man hat dies aus den Flecken gefunden, die theilweise eine große Beständigkeit, bis zu 50 Jahren Dauer haben; diese dunkeln Flecken finden sich theils isolirt, theils in etwas weniger dunkeln und in hellen, dem Aeq. parallelen Streifen, welche theilweise sehr beständig, theils sehr veränderlich sind, und oftmals auch periodisch auftretende helle eiförmige Flecken enthalten, die wie auch die manchmal auftretenden rothen Streifen in ähnlicher Weise mit den Sonnenflecken zusammenzuhängen scheinen, wie die Cirruswolken der Erde. Die beständigen Streifen ziehen um den ganzen Jupiter, werden am Rande schwächer und zeigen hierdurch die Existenz einer Atmosphäre an, in welcher durch die große Centrifugalkraft des Jupiter die Wolken leicht Streifenform annehmen mögen; auch die starke Abplattung $^1/_{17}$ rührt von derselben her. Aus der starken Leuchtkraft des Jupiter im Vergleiche zu der des Mars und in Verbindung mit seiner Größe, aus der großen Dichte seiner Atmosphäre hat man geschlossen, daß der Jupiter noch in glühendem Zustande sei. Höchst interessant sieht der Jupiter durch ein Fernrohr aus, ein kleines Weltsystem mit 4 Trabanten in lebhaft wechselnden Stellungen; die Monde sind verhältnißmäßig nicht so weit vom Jupiter als unser Mond von der Erde entfernt, 57 bis 250 Tausend M., drehen sich aber sehr rasch um den Jupiter, in 42 St. bis 16 T., haben eine bedeutende Größe, ca. 600 M. Dm., größer als unser Mond, und werden fast bei jedem ihrer raschen Umläufe durch den mächtigen Schatten des Jupiter verfinstert, woraus Römer zuerst die Geschw. des Lichtes bestimmte.

571

572 6. Saturn. Obwohl dieser weiße ruhige Stern nur 1/20 der Helligkeit des Jupiter besitzt, indem er fast doppelt so weit als dieser, 190 M. M., von der Sonne entfernt ist, so erscheint er doch noch als Stern erster Größe, da sein Dm., 17000 M., dem des Jupiter fast gleich kommt. Indessen kann er der Sonne auf 160 M. M. nahe rücken und sich auf 220 M. M. entfernen, da die Exc. seiner Bahn ziemlich groß = 0,06 ist; ebenso ist auch seine Kugelform stark abgeplattet, fast 1/10, womit seine rasche Rotation, in 10 St., stimmt, während er für seine Revolution 29 Jahre braucht. Die Rotation schloß man aus dunkeln Flecken, die sich in mehreren dem Aequator parallelen Streifen finden, die wie beim Jupiter oft lange constant bleiben, während die Polargegenden im Winter etwas heller werden. Man hält dies für Veränderungen in den oberen Schichten des Saturn, denen man eine wolkenartige Beschaffenheit zuschreibt, und unterhalb deren man nur einen kleinen Kern voraussetzt, und zwar deßhalb, weil die Dichte des Saturn nur 1/8 der Erddichte beträgt und der Planet demnach nicht einmal durchgängig aus Wasser bestehen kann. Die Masse des ganzen Saturn beträgt nämlich nur 100 Erdmassen, während sein Volumen = 900 Erdinhalten ist. Das Saturnsystem ist das reichste der Partialsysteme unserer Sonne, indem 8 Monde und 3 Ringe um den Planet kreisen; die Monde sind 3—64 Saturnshalbmesser von demselben entfernt, haben Umlaufzeiten von 22 St. bis 80 T., und befolgen hinsichtlich der Abstände und der Umlaufzeiten eine der Titius'schen Regel ähnliche Reihenfolge. Das ältere Ringsystem hat einen äußeren Dm. von 37000, einen inneren von 25000 M., ist also 6000 M. breit, von dem Planeten 4000 M. entfernt und durch eine Spalte von 400 M. Breite in 2 Abtheilungen getheilt; 1850 wurde innerhalb dieses Ringsystemes ein 3. durchsichtiger Nebelring entdeckt. Die Dicke des Ringes beträgt vielleicht nur 30 M., daher ist er, wenn die Sonne nur die Kante bescheint, entweder gar nicht oder nur als schmale Lichtlinie sichtbar; sonst erscheint er in Form von Henkeln oder Ansen, weil seine Ebene gegen die Ekliptik um 28° geneigt ist, und weil die Theile vor und hinter der Saturnskugel unsichtbar sind. Doch kann er auch noch unsichtbar werden, wenn seine Ebene durch die Erde geht.

573 7. Uranus (W. Herschel 1781) erscheint als Stern 6—7. Gr., da er fast doppelt so weit als Saturn, im Mittel 380 M. M. entfernt ist und nur 8000 M. Dm. hat. Seine Umlaufzeit beträgt 84 Jahre, seine Tageszeit ist nicht bekannt, kann aber nur kurz sein, da man eine starke Abplattung wahrgenommen hat. Das Volum ist 100 mal, die Masse nur 16 mal größer als bei der Erde, woraus die Dichte sich = 1/6 der Erddichte ergibt. Herschel nahm 6 Trabanten am Uranus wahr, von denen indeß Lassell nur 4, Ariel, Umbriel, Titania und Oberon beobachten konnte, deren Elemente Newcomb in Washington (1873) aufgefunden hat. Diese Monde sind, wenigstens die beiden äußeren, rückläufig und ihre Bahnen stehen fast auf der Ekliptik senkrecht; da nun die Mondbahnen gewöhnlich mit dem Aeq. zusammenfallen, so müßte der Aeq. des Uranus auf der Ekliptik und daher auch nahezu auf seiner eigenen Bahn senkrecht stehen, wenn sich der Uranus wie die anderen Planeten verhielte; hierdurch würden die Zonen und Jahreszeiten des Uranus ganz abweichend werden. Besonders wichtig wurden die Störungen des Uranus; sie führten zur Entdeckung des

574 8. Neptun (Leverrier und Galle 1846). Am Uranus zeigten sich Störungen, welche sich aus den bekannten Planeten nicht erklärten, und welche daher die Vermuthung erweckten, daß sie von einem transuranischen unbekannten Planeten herrühren dürften. So wie man aus der bekannten Stellung eines störenden Planeten nach dem Gravitationsgesetze die Art und Größe einer zukünftigen, also noch unbekannten Störung herausrechnen kann, so kann man auch aus einer bekannten Störung die Stellung des unbekannten störenden Planeten finden. Leverrier stellte sich daher die Aufgabe, die Elemente des unbekannten Planeten zu berechnen, welcher die bekannten aber unerklärlichen Störungen des Uranus hervorzubringen vermöchte, und theilte die Resultate dieser Rechnung der Berliner Sternwarte mit, weil man auf dieser kurz vorher neue sehr vollständige Sternkarten der äquatorialen Gegenden angefertigt hatte und demnach mit Bestimmtheit einen Stern für einen Planeten erkennen mußte, der an einer Stelle des Himmels stand, an welcher die Karten keinen Stern enthielten; noch am Tage des Empfanges der Nachricht, 25. Sept. 1846, fand Galle an der bezeichneten Stelle den Planeten, der dann den Namen Neptun erhielt. Nähere Untersuchung ergab, daß dessen Entf. von der Sonne 620 M. M. beträgt, also nicht der Titius'schen Regel entspricht. Die Umlaufzeit um die Sonne beträgt 164 Jahre, der Dm. 7500 M., die Masse und Dichte sind größer als beim Uranus. Lassell fand 1847 einen Neptunstrabanten, der in 5 T. um den Planeten läuft und besser sichtbar, also größer ist als die Uranusmonde (Elemente von Newcomb 1873).

575 Das Zodiakallicht erscheint in der Tropenzone jeden Abend und Morgen, bei uns hauptsächlich im Frühling und Herbst als ein zarter kegelförmiger Schimmer, dessen Basis an der Stelle den Horizont berührt, wo unter diesem die Sonne steht, dessen Achse

in die Richtung der Ekliptik fällt, und dessen Spitze bis zu einer Höhe von 50—90° aufsteigt. Viele halten es für einen Nebelring, der zwischen der Venus- und Marsbahn frei im Weltraume schwebend die Sonne umziehe, und durch welchen die Erde etwa im Jahresanfange hindurch gehe. Heis dagegen erklärt das Zodiakallicht, gestützt auf einen öfter von ihm wahrgenommenen Gegenschein von gleicher Form an der entgegengesetzten Himmelsseite, für einen nebelartigen Ring, der innerhalb der Mondbahn um die Erde kreise und durch den Erdschatten theilweise verfinstert werde.

5. Der Mond und die Finsternisse.

576 **Astronomische Erscheinungen des Mondes.** Bestimmt man mittels der Parallaxe die Entfernung des Mondes von der Erde, so findet man dieselbe ca. 50 000 M., also 400mal kleiner als die der Sonne. Leicht fällt in die Augen, daß der Mond von Westen nach Osten durchschnittlich jeden Tag 13° zwischen den Sternen hinwandert; da seine Entfernung sich hierbei nicht viel ändert, so folgt daraus, daß er in ca. 28 Tagen um die Erde kreist, daß er ein Trabant der Erde ist. Seine Bahn ist eine Ellipse mit 0,055 Excentricität und einer Neigung von 5° gegen die Ekliptik, welche aber um 18′ veränderlich ist. Außerdem behält die Bahn nicht dieselbe Lage bei, die Knoten rücken in 19 Jahren von Osten nach Westen also rückläufig durch die ganze Ekliptik herum, und auch die Apsidenlinie beschreibt schon in 8 Jahren rechtläufig eine ganze Drehung. Die scheinbare Größe des Mondes ist in der mittleren Entfernung = 31′ 19″, woraus sich der Durchmesser = 469 M. ergibt; folglich ist das Volumen des Mondes $^1/_{50}$ des Erdinhaltes. Die Masse des Mondes hat man aus seiner anziehenden Wirkung auf die Erdmeere, der Fluth, berechnet und = $^1/_{80}$ der Erdmasse gefunden, woraus sich die Mondschwere = $^1/_6$ der Erdschwere und die Monddichte = 0, 6 der Erddichte ergab. Da der Mond in 28 T. um die Erde kreist, so nimmt er verschiedene Stellungen gegen Erde und Sonne ein, welche die Lichtwechsel oder Phasen des Mondes erzeugen. Steht der Mond zwischen Sonne und Erde in Conjunction, so wendet er uns die unbeleuchtete Hälfte zu, ist unsichtbar: Neumond; wenn er sich nun von der Sonne nach Osten zu entfernt, so steht er in 7 Tagen in Quadratur, seine westliche oder rechte Hälfte ist erleuchtet, von der wir nur die Hälfte sehen: es ist erstes Viertel; 7 Tage später steht er in Opposition, wendet uns dieselbe Hälfte wie der Sonne zu, erscheint uns daher ganz beleuchtet: es ist Vollmond; wieder 7 Tage später steht er nach Osten zu 3 Quadranten von der Sonne entfernt, nach Westen zu 1 Quadrant, seine östliche oder linke Hälfte ist beleuchtet: es ist letztes Viertel. Findet der Neumond in oder nahe bei einem Knoten statt, so ist Sonnenfinsterniß; findet der Vollmond nahe bei einem Knoten statt, so ist Mondfinsterniß. Eine Mondphase wiederholt sich, wenn der Mond in dieselbe Stellung zu Sonne und Erde zurückkehrt; die Zeit, in welcher dies geschieht, nennt man den synodischen Monat = 29 T. 12 St. 44 M.; er ist länger als der siderische Monat = 27 T. 7 St. 43 M. 12 Sec., die Zeit einer ganzen Drehung oder der Wiederkehr zu denselben Fixsternen. Diese Umlaufzeit und die 4 Phasen haben die Eintheilung des Jahres in Monate und Wochen veranlaßt. Der Mond dreht sich um sich selbst und zwar in derselben Zeit, in der er sich um die Erde dreht, was nach Hansen davon herrührt, daß der Schwerpunkt des Mondes 8 M. jenseits des Mittelpunktes liegt. Wegen der Gleichheit der Zeit der Revolution und der Rotation wendet uns der Mond immer dieselbe Seite zu, mit Ausnahme einer kleinen seitlichen Schwankung, die man Libration nennt. Die Mondbahn erfährt eine ganze Reihe von periodischen und säcularen Störungen; die wichtigsten sind: 1. die Evection, 2. die Variation, 3. die jährliche Gleichung, 4. die Schwingung der Neigung, 5. der Rückgang der Knoten, 6. das Fortschreiten der Apsiden, 7. die Acceleration.

Während für die meisten Fixsterne selbst die jährliche Parallaxe zu klein ist, um nach den jetzigen Methoden auffindbar zu sein, und während für die Sonne und die Planeten die Horizontalparallaxe nur mit Schwierigkeiten gefunden werden kann, macht für den Mond schon eine kleine Standlinie eine meßbare Parallaxe möglich. Unter Parallaxe kurzweg versteht man den Winkel, den 2 von den Endpunkten einer Standlinie nach einem Himmelspunkte gezogene Visirlinien mit einander einschließen; bilden diese 2 Linien mit der Standlinie ein gleichschenkeliges Dreieck, und kennt man in demselben die Basis, nämlich die Standlinie, und den Winkel an der Spitze, d. i. die Parallaxe, so kann man sowohl mittels geometrischer Construction, als auch und zwar genauer auf trigonometrischem Wege die Schenkel des Dreiecks, d. i. die Länge der Visirlinien, d. i. die Entfernung des Himmelspunktes von den Standpunkten finden. Liegen die beiden Standpunkte auf einem Meridian, zu beiden Seiten des Aequators, so ist die Parallaxe, wie eine einfache geometrische Zeichnung ergibt, gleich der Summe der Zenithdistanzen des Himmelspunktes vermindert um die Summe der geographischen Breiten der Standpunkte. So beobachtete 1751 Lalande in Berlin die Zenithdistanz des südlichen Mondrandes, als derselbe in den Meridian trat = 41° 15′ 44″ und Lacaille dieselbe am Cap = 46° 33′ 37″; die Breiten der beiden Orte sind 52° 31′ 13″ und 33° 55′ 15″; hieraus ergab sich die Parallaxe = 1° 22′ 53″. Nun mußte man zur Berechnung der Entfernung noch die Erdsehne zwischen Berlin und dem Cap kennen; einfacher ist dieselbe jedenfalls, wenn eine schon bekannte Standlinie zu Grunde gelegt wird; deßhalb hat man den Erdradius als Standlinie gewählt, und nennt Höhenparallaxe den Winkel, den 2 von den Endpunkten eines Erdradius nach dem Himmelspunkte z. B. dem Monde gezogene Visirlinien mit einander machen; von dem Oberflächenpunkte kann man nach dem Monde wirklich visiren, von dem Erdmittelpunkte aber nicht; indeß diese 2. Visirlinie trifft die Erdoberfläche in einem Punkte, in dessen Zenith der Mond steht; demnach muß der eine der beiden in einem Meridian aufgestellten Beobachter den Mond in seinem Zenith haben und die Stellung desselben zur Himmelskugel, zu den Fixsternen notiren, während der andere dasselbe thut; der Bogen zwischen den beiden Stellungen ist die Höhenparallaxe. Die Höhenparallaxe ist um so kleiner, je näher der Mond dem Zenith dieses zweiten Beobachters steht; die Horizontalparallaxe ist demnach die größte, weßhalb sie meist benutzt wird. Sie ist auch am leichtesten zu beobachten, denn sie ist gleich dem Bogenabstande der 2 Punkte des Himmels, an welchen der Mond für 2 Beobachter steht, von welchen der eine den Mond im Zenith hat, während er für den anderen eben aufgeht oder im Horizont erscheint, weßhalb diese Parallaxe Horizontalparallaxe genannt wird. So findet man die mittlere Horizontalparallaxe = 58′ 44″ und daraus die mittlere Entfernung des Mondes = 51 800 M.; bestimmt man dieselbe in verschiedenen Stellungen, so findet man die kleinste, das Perigäum = 48 060 M. und die größte, das Apogäum = 54 960, woraus die Exc. der Mondbahn = 0,055 sich ergibt.

Die Bahn des Mondes um die Sonne stellt man sich häufig als eine verschlungene Radlinie vor; doch sind die Ein- und Ausbiegungen der Mondbahn zu beiden Seiten der Erdbahn so unbedeutend, daß man an einer Zeichnung der Mondbahn ohne die Erdbahn solche nicht wahrnehmen kann, sondern nur eine durchweg convexe Curve sieht. Wegen der Neigung der Mondbahn gegen die Ekliptik ist die größte Höhe des Mondes zu verschiedenen Zeiten noch verschiedener als die der Sonne. Die höchste Sonnenhöhe im Sommer beträgt bei uns 64°, die Summe der Aequatorhöhe und der Schiefe der Ekliptik, im Winter nur 17°, die Differenz derselben beiden Größen. Der Mond steht nun jeden Monat 5° über oder unter der Ekliptik, und zwar der Neumond, da er bei der Sonne steht, 5° über oder unter der Sonne selbst, was unsichtbar ist, und der Vollmond, da er der Sonne gegenüber steht, 5° über oder unter dem entgegengesetzten Theile der Ekliptik; der Vollmond steht also im Sommer im südlichen Theile der Ekliptik, unter dem Aeq., im Winter im nördlichen Theile, über dem Aequator; deßhalb scheint der Mond im Winter länger und steht höher als im Sommer, er kann im Winter bei uns 68° Höhe erreichen und im Sommer bis auf 12° Höhe herabgehen. Doch wiederholen sich diese Erscheinungen nicht jedes Jahr in gleicher Weise wegen des Rückganges der Knoten. Schneidet der Mond die Ekliptik in ihrer höchsten Stelle wie im Jahre 1872, so stimmt seine höchste und tiefste Höhe mit der der Sonne; da Finsternisse nur stattfinden, wenn der Mond der Ekliptik nahe kommt, so müssen dieselben jetzt zur Zeit des höchsten und tiefsten Sonnenstandes, der Solstitien, eintreten. Nach 19 Jahren aber haben die Knoten wieder dieselbe Lage; folglich rücken sie nach 5 Jahren in die Aequinoctien, dann finden also die Finsternisse zu diesen Zeiten statt. Die Chaldäer kannten schon die Periode von 223 Monaten, innerhalb welcher die Monderscheinungen sich wiederholen, und Thales soll hieraus eine Sonnenfinsterniß vorausgesagt haben.

Da der Neumond zwischen uns und der Sonne steht, so befindet er sich für uns bei der Sonne, geht mit ihr auf und unter, ist bei Tage am Himmel. Nach dem Neumonde

bewegt sich der Mond nach Osten zu, steht etwas östlich von der Sonne, folglich ist ein schmaler Theil seiner westlichen, oder da wir den Mond immer im Süden sehen, seiner rechten Seite beleuchtet; dieser erscheint uns sichelförmig nach rechts gekrümmt, weil Ausschnitte einer Kugeloberfläche beiderseits gekrümmt sind und nach den Enden hin schmäler werden; da die Sichel des wachsenden Mondes östlich von der Sonne steht, so geht sie bald nach der Sonne unter und auf, der zunehmende Mond ist Abends am Himmel, Nachts und Morgens nicht; bei Tage aber sieht man die Sichel als Silberschiffchen der Sonne folgen. Neben der leuchtenden Mondsichel sieht man bei Nacht den übrigen Theil des Mondes schwach grau beleuchtet, das aschgraue Licht des Mondes; dasselbe rührt von dem Erdscheine her, der zur Zeit unseres Neumondes für etwaige Mondbewohner als Vollerde, zur Zeit unserer Mondsicheln dort noch nahezu als Vollerde auftritt und daher den dunkeln Mondtheil beleuchtet; die Sichel scheint einem größeren Kreise anzugehören, wegen der Ausbreitung des stärkeren Lichteindruckes auf unsere Netzhaut. Wenn sich nun auf seiner westöstlichen Bahn der Mond immer weiter von der Sonne nach Osten zu entfernt, so sehen wir ein immer größeres Stück der westlichen beleuchteten Hälfte, die Sichel wird immer breiter und wird in 7 Tagen zu einem Halbkreise, weil der mittlere Kreis einer Kugel uns als gerade Linie erscheint; da dieses erste Viertel in der östlichen Quadratur auftritt, so geht der Mond $^1/_2$ Tag nach der Sonne unter; das erste Viertel ist von Nachmittag bis Mitternacht am Himmel, es erhellt die Abende. Während der Neumond mit der Sonne aufgeht, geht das erste Viertel 6 Stunden später auf, weil in diesen 7 T. der Mond ein Viertel seines Kreises zurückgelegt hat; der Mond geht daher jeden Tag $^6/_7$ Stunden, etwas über 50 M. später auf. Beim Vollmonde steht der Mond der Sonne gegenüber, er geht auf, wenn die Sonne untergeht, er ist bei Nacht am Himmel, er leuchtet die ganze Nacht, doch mehr im Winter wie im Sommer. In der zweiten Quadratur, beim letzten Viertel, steht der Mond nach Osten zu 3 Quadranten, also nach Westen zu 1 Quadrant von der Sonne entfernt, die östliche oder linke Mondhälfte ist erleuchtet, der Mond geht 6 St. vor der Sonne auf, ist von Mitternacht bis Mittag am Himmel, leuchtet Morgens. Es findet wieder Neumond statt, wenn der Mond wieder zwischen Erde und Sonne steht; während aber der Mond vom vorigen Neumonde an sich völlig in $27^1/_4$ T., in dem siderischen Monat um die Erde drehte, ist die Erde auf ihrer westöstlichen Bahn um die Sonne um $27^1/_4 : 365 = {}^1/_{13}$ vorangegangen; diesen Theil des Himmels muß der Mond noch zurücklegen, um wieder zwischen Erde und Sonne zu gelangen; daher ist der synodische Monat, die Zeit zwischen 2 gleichen Mondphasen länger als der siderische und zwar $27^1/_4 : 13$, d. i. mehr als 2 Tage.

Wenn man eine geschlossene mit Wasser und Quecksilber theilweise gefüllte Röhre radial aber geneigt in einer Schwungmaschine aufstellt und rasch dreht, so geht das Quecksilber nach außen, das Wasser nach innen. Da nun wegen der großen Geschwindigkeit und dem kleinen Krümmungsradius der Mondbahn die Centrifugalkraft in derselben zu bedeutender Geltung gelangt, so mußten die schwereren Massen nach der jenseitigen Hälfte des Mondes gehen und müssen nun durch ihre Centrifugalkraft den Mond in dieser Stellung erhalten. Hieraus folgt nach Hansen, daß der Mond der Erde immer dieselbe Seite zuwenden muß, daß seine Rotationszeit mit der Umlaufzeit um die Erde stimmt; auf dem Monde sind also Tag und Nacht 28 Erdentage lang. Da auf dem Monde die Luft fehlt, so ist am Tage der Himmel nicht blau, sondern schwarz, hell ist es nur, wohin die Sonne scheint, Dämmerung, Morgenroth und Wolken fehlen, bei Nacht erscheinen die Sterne nur als Punkte; doch wird die lange Nacht durch den Erdschein erhellt, der 13mal größer als unser Vollmond ist, und der für jeden Standpunkt immer an derselben Stelle stehen bleibt, für den Mondscheibenmittelpunkt im Zenith, für den Mondrand im Horizont; dies erklärt sich daraus, daß durch die Drehung des Mondes um sich selbst der Erdschein ebenso viel nach Westen rückt, als er durch die gleichzeitige Drehung um die Erde nach Osten geht. Für die Bewohner der jenseitigen Mondhälfte ist der Erdschein unsichtbar mit Ausnahme der Theile, die durch die Libration uns sichtbar werden. Die Libration erklärt sich dadurch, daß von verschiedenen Stellen der Erde aus verschiedene Mondtheile hinter dem Rande hervortreten, wie man an einem und demselben Körper je nach veränderter Eigenstellung andere Theile überblickt, besonders aber daraus, daß der Mond sich gleichförmig um sich selbst dreht, während er nach dem 2. Keppler'schen Gesetze mit ungleicher Geschwindigkeit um die Erde geht. Der Unterschied der Jahreszeiten ist auf dem Monde fast unmerklich, weil sein Aequator gegen die Ekliptik, mit welcher seine Bahn um die Sonne durchschnittlich zusammenfällt, nur um 1° geneigt ist.

Die Störungen des Mondes werden hauptsächlich von der Sonne hervorgerufen. 1. Die Evection (Ptolemäus 130) besteht darin, daß die Länge des Mondes zur Zeit der Syzygien größer, zur Zeit der Quadraturen aber kleiner ist, als sie nach der elliptischen Bahn sein sollte. Durch die Anziehung der Sonne werden in den beiden ersten Stellungen Erde und Mond weiter von einander entfernt, die Erde zieht den Mond schwächer an, und

dessen Bewegung wird hierdurch langsamer. 2. Die Variation (Tycho de Brahe 1590) besteht in einer Verminderung oder Vermehrung der Länge in den Octanten, den Mitteln zwischen Quadraturen und Syzygien, welche durch die Tangentialkraft des Mondes hervorgebracht wird. 3. Die jährliche Gleichung (Tycho) besteht darin, daß die Evection im Winter stärker ist als im Sommer, weil im Winter die anziehende Wirkung der Sonne größer ist, da das Perihel der Erde im Winter stattfindet. 4. Die Schwingung der Neigung und 5. der Rückgang der Knoten haben ihren Grund darin, daß die Mondbahn nicht in die Ekliptik fällt, daß aber die Sonne in der Ekliptik anziehend wirkt, wodurch, da der Mond bald dies- bald jenseits der Ekliptik steht, die Neigung um 18 Minuten hin- und herschwankt, und der Mond immer etwas eher in die Ekliptik tritt, als es nach der rein elliptischen Bahn sein sollte. Es rücken daher bei jedem Mondumlaufe die Knoten dem Monde entgegen, bewegen sich von Osten nach Westen und haben in 19 Jahren wieder die frühere Stelle erreicht, die alte chaldäische Mondperiode. Die Zeit, in welcher der Mond die Ekliptik auf derselben Seite wieder schneidet, die Zeit zwischen zwei gleichnamigen Knoten, der Drachenmonat ist daher kürzer als die Umlaufzeit, beträgt nur 27 T. 5 Stunden. 6. Das Fortschreiten der Apsiden besteht darin, daß die Apsidenlinie in nahezu 9 Jahren eine rechtläufige Drehung vollendet, und rührt daher, daß die Sonne das Bestreben hat, die Mondbahn nach sich hin in die Länge zu ziehen und dadurch die große Achse derselben hinter sich drein zu drehen. Diese Drehung beträgt jährlich 40°; Perigäum und Apogäum eilen deßhalb dem Monde voraus, weßhalb der anomalistische Monat, die Zeit zwischen zwei Perigäen etwas größer als der siderische Monat, = 27 T. 13 St. ist. 7. Die Acceleration (Halley) besteht darin, daß ausnahmsweise bei dem Monde die siderische Umlaufzeit, die bei allen Weltkörpern constant ist, sich schon seit Jahrtausenden verkürzt, also seine Geschwindigkeit sich vergrößert. Diese Erscheinung rührt daher, daß die Exc. der Erdbahn sich 50 000 Jahre lang verkleinert und dann eben so lange vergrößert, wodurch im ersten Falle die Sonne dem Monde etwas näher kommt und dadurch seine Geschwindigkeit etwas vergrößert.

577 **Physik des Mondes.** Der Mond hat keine Atmosphäre, also auch kein Wasser, keine Meere, er ist in vulcanischer Erstarrung. Man unterscheidet auf seiner Oberfläche schon mit blosem Auge helle und dunkle Stellen; die dunkeln Stellen hielt man früher für Meere, und sie haben noch die ihnen damals gegebenen Meernamen; jetzt weiß man, daß diese Maren mehr oder minder ebene Oberflächentheile sind. Die hellen Stellen sind Gebirgslandschaften: man unterscheidet gewöhnliche Gebirge und Ringgebirge; die gewöhnlichen Gebirge sind unregelmäßig neben einander gelagerte Massen mit kuppelförmigen Gipfeln und steilen, unregelmäßig gezogenen Thälern; die Höhen hat man gemessen aus der Länge der Schatten, aus der Entfernung eines in dem dunkeln Mondtheile schon hell erscheinenden Gipfels von der Lichtgrenze, und endlich aus der Länge der Zacken am Mondrande; der Kaukasus hat Gipfel von 18 000, die Apenninen von 17 000′. Höher noch sind die Ringgebirge, ringförmige Wälle um Ebenen oder Centralberge gezogen bis zu 30 M. Durchmesser, aber auch von unmeßbarer Kleinheit; man unterscheidet Wallebenen, Ringgebirge und Krater. Merkwürdig erscheinen die Rillen, bis 30 M. lange Gruben, und die Strahlensysteme, zur Zeit des Vollmondes von manchen Ringgebirgen strahlenartig ausgehende sehr helle Lichtlinien. Während man früher die vulcanische Thätigkeit des Mondes für erstarrt hielt, hat Schmidt seit 1856 am Krater Linné und 2 anderen Kratern Veränderungen beobachtet, die er für ein Ausfüllen und Ueberfließen der Krater hält.

Für die Abwesenheit oder unmerkbare Verdünntheit einer Atmosphäre führt man folgende Gründe an: An den Mondrand heranrückende Sterne zeigen weder eine Schwächung des Lichtes, noch eine Veränderung in der Stellung, wie sie die Brechung der Sternstrahlen durch die Mondatmosphäre hätte herbeiführen müssen, noch auch (Huggins 1865) eine neue Spectrallinie, oder einen dunkeln Spectralstreifen, wie sie von einer Atmosphäre hervorgerufen werden, ebenso stimmt das Spectr. des Mondlichtes vollkommen mit dem Sonnensp. Die Schatten der Gebirge sind so schwarz, wie sie durch Luft gesehen nicht erscheinen könnten. Nie sind Wolken oder dunstartige Trübungen auf der Mondscheibe wahrgenommen worden. Wenn nun auf dem Mond keine Luft ist, so kann auch kein Wasser vorhanden sein, weil im luftleeren Raume das Wasser bei der niedrigsten Temperatur kocht; dafür sprechen auch die Thatsachen, daß die Mondgebirge steil abfallen, keine verzweigten Thalbildungen aufweisen, und daß auf dem Monde Alles polyedrisch, nichts

abgerundet oder sanft abgedacht ist, wie Wasserwirkungen es hervorbringen. Zur Zeit, als man die Abwesenheit von Wasser noch nicht vermuthete, hielt man die dunkeln Flecken für Meere, weil glatte Oberflächen das Licht nur nach einer Richtung reflectiren und daher in allen anderen Richtungen dunkel erscheinen müssen, während rauhe Flächen das Licht nach allen Richtungen hin zerstreuen und daher von allen Seiten hell erscheinen; aus denselben Gründen hielt man die dunkeln Stellen nachher für Ebenen, und fand diese Ansicht bei späterer genauerer Untersuchung bestätigt, obwohl sie sich sehr häufig als ziemlich uneben herausstellten. Die größten sind der Oceanus procellarum (9000 Q.-M.) auf der Osthälfte, und auf der Westhälfte die zusammenhängenden mare serenetatis, mare tranquillitatis, mare fecunditatis, mare nectaris. Auch in diesen Gebilden tritt schon die den Mond beherrschende Kreisform auf, die in den Wallebenen, großen, von einem Walle umschlossenen Ebenen, den kleineren Ringgebirgen und den zahllosen kleinen Kratern, sowie selbst in den gewöhnlichen Gebirgen überall vorkommt und die ausschließlich vulcanische Natur des Mondes charakterisirt. Die Wälle der Ringgebirge sind häufig innen und außen von Terrassen umlagert, von Kuppen und Schluchten unterbrochen, innen tiefer als außen, so daß der öfter vorkommende Centralberg häufig nicht die Höhe der äußeren Landschaft erreicht. Nach Schmidt erreicht eine Kuppel im Walle des Curtius die Höhe von mehr als 27 000′, die höchste Erhebung auf dem Monde; die Wälle gehen oft über 20 000′ Höhe hinaus, während der Durchmesser der Ringgebirge und Wallebenen 7—31 M. erreicht, so daß ganze Länder in einem solchen Ringe Platz hätten. Die Krater sind in ungeheurer Anzahl in den südlichen Theilen des Mondes verbreitet, bald isolirt, bald mehr zusammen, ja perlschnurartig an einander gereiht, mit gesprengten Thoren, von unergründlicher Tiefe. — Die Gesammtzahl der Rillen beläuft sich bis jetzt auf bald 500, Schmidt hat allein an 300 aufgefunden und untersucht. In den Phasen erscheinen sie als dunkle, im Vollmonde als helle Linien, sie sind Risse, Spalten in der Mondfläche bis zu 30 M. Länge, bis zu ½ M. Breite und 1000′ Tiefe; manchmal durchsetzen sie Krater oder endigen an solchen. — Die Strahlensysteme sind weder Erhöhungen noch Vertiefungen, da sie bei schiefer Beleuchtung keine Spur von Schatten zeigen, sondern ganz verschwinden, und erst beim Vollmonde als helle Streifen von 0,2 bis 4 M. Breite und oft mehr als 100 M. Länge von manchen Ringgebirgen aus in großer Zahl durch alle Mondgebilde hinziehen; ihr Wesen ist unbekannt.

Die Finsternisse. Eine Mondfinsterniß ist der Eintritt des Vollmondes in den Erdschatten; sie kann sich nur ereignen, wenn der Vollmond in oder nahe bei einem Knoten stattfindet. Man unterscheidet totale und partiale Mondfinsternisse; bei einer totalen Finsterniß tritt die ganze Mondscheibe in den Schatten, verschwindet aber nicht und erscheint auch nicht absolut dunkel, sondern nur sehr dunkel roth. Eine Sonnenfinsterniß ist eine ganze oder theilweise Verdeckung der Sonne durch den Neumond; sie findet nur statt, wenn der Neumond in oder nahe bei einem Knoten eintritt. Man unterscheidet totale, partiale und ringförmige Sonnenfinsternisse. Während bei einer Mondfinsterniß der verfinsterte Mond oder Mondtheil nicht ganz verschwindet, ist bei einer Sonnenfinsterniß die Sonne ganz oder theilweise absolut unsichtbar, so daß bei einer totalen Sonnenfinsterniß nur die Sonnenatmosphäre als Strahlenkranz oder Corona und einzelne hoch emporschießende glühende Wasserstoffsäulen als Protuberanzen an dem Mondrande übrig bleiben. Während eine Mondfinsterniß ziemlich gleichzeitig von Allen erblickt wird, die sie sehen können, wird eine Sonnenfinsterniß im Osten oft viele Stunden später als im Westen gesehen. Während eine totale Mondfinsterniß stundenlang dauern kann, beträgt die Dauer der Totalität bei einer Sonnenfinsterniß noch nicht 10 Min. Während eine Mondfinsterniß von allen bemerkt wird, die den Mond sehen, ist eine Sonnenfinsterniß nur für die Erdzone sichtbar, über welche der Mondschatten hinläuft; die Punkte, welche im Halbschatten des Mondes liegen, haben partiale Sonnenfinsterniß, die im Kernschatten liegen, totale, die nur von der Verlängerung des Kernschattens getroffenen Punkte ringförmige Sonnenfinsterniß. Während in 18 Jahren nur 29 Mondfinsternisse vorkommen, sind in derselben Zeit für die ganze Erde 41, für denselben Ort aber nur etwa 10 Sonnenfinsternisse möglich. 578

Wenn die Mondbahn mit der Ekliptik zusammenfiele, so würde bei jedem Neumonde eine Sonnenfinsterniß und bei jedem Vollmonde eine Mondfinsterniß stattfinden, weil dann die 3 Weltkörper bei den Syzygien immer in gerader Linie ständen, der Neumond uns

dann immer die Sonne verdecken und der Vollmond in den Erdschatten treten müßte. Da aber die Mondbahn mit der Ekliptik einen Winkel von 5° bildet, so kann der Mond über oder unter der Verbindungslinie von Erde und Sonne vorbeigehen, ohne eine Finsterniß zu erzeugen; eine solche kann demnach nur entstehen, wenn Neu- oder Vollmond in oder nahe bei der Ekliptik stehen, d. h. wenn dieselben in oder nahe bei einem Knoten stattfinden. Die Knoten wandern nun bekanntlich in 19 Jahren durch die ganze Ekliptik herum, daher wiederholen sich nach Ablauf dieser Zeit die Finsternisse ziemlich in derselben Weise, woraus schon bei alten Völkern diese Erscheinungen vorherbestimmt wurden. Doch braucht der Mond nicht genau in dem Knoten selbst zu stehen, um Finsternisse möglich zu machen; denn der Erdschattenkegel ist mehr als 180 000 M. lang, also in dem Mondabstande noch ca. 1200 M. dick, so daß er den nur 400 M. dicken Mond noch total, noch viel mehr aber partial verfinstern kann, ohne daß die Mittelpunkte zusammenfallen; ebenso tritt für die Sonnenfinsternisse der günstige Umstand ein, daß der verdeckende Körper, der Mond uns 300mal näher ist als die Sonne, und daß ein kleiner Körper einen großen um so leichter unserm Auge entzieht, je näher der kleine uns ist im Vergleiche mit dem großen. Aus diesen Verhältnissen ergibt sich, daß eine Mondfinsterniß noch möglich ist, wenn der Vollmond 13° vom Knoten entfernt ist, und daß dieselbe Entfernung für die Sonnenfinsternisse gar 20° beträgt, woraus die Zahl der Sonnenfinsternisse innerhalb der Periode von 18 Jahren sich ergibt. Nach Ablauf derselben treten trotz der Wiederkehr der Knotenerscheinungen die Finsternisse nicht genau wieder in derselben Art und Folge auf, weil die Entfernungen von Sonne und Mond von der Erde nicht in denselben Perioden wiederkehren wie die Knoten, und doch von wesentlichem Einfluße sind. So kann die Länge des Mondschattens hierdurch 49 000—51 000 M. werden, während die Entfernung des Mondes 48 000—54 000 M. beträgt; deßhalb kann der Mondschattenkegel noch von der Erdoberfläche geschnitten werden, er kann aber auch die Erde nur eben mit seiner Spitze berühren, und kann endlich auch die Erde nicht einmal mit seiner Spitze erreichen. Im ersten Falle fällt auf die Erde ein dunkler Schattenkreis, der Kernschatten, umgeben von einem immer heller werdenden halbdunkeln Kreise, dem Halbschatten, welche mit einander wie der Mond selbst von Westen nach Osten über die Erde hinziehen; wer in den Kernschattenstreifen fällt, hat totale Sonnenfinsterniß, weil in den Kernschatten von keinem Theile des leuchtenden Körpers Licht gelangt; wer in dem Halbschatten liegt, hat partielle Finsterniß, weil der Halbschatten von Theilen des leuchtenden Körpers Licht erhält. Im zweiten der drei Fälle haben nur die Punkte einer Linie eine totale Finsterniß ohne Dauer; im dritten Falle entsteht nur partielle Finsterniß; den Orten aber in der Mitte des Kernschattens ist nur der mittlere Theil der Sonne durch den Mond verdeckt; denn dieser Schattenfall tritt nur ein, wenn der Mond weiter entfernt und die Sonne näher ist als gewöhnlich, so daß der Mond, der uns gewöhnlich an Größe der Sonne gleich erscheint, nun kleiner ist als diese und daher einen ringförmigen Raum der Sonne rings um seine dunkle Scheibe sichtbar läßt; ein solcher Lichtring, mehr oder weniger regelmäßig, ist für alle Erdpunkte sichtbar, die von der Verlängerung des Kernschatttens getroffen werden. Der durch den Mond zugedeckte Theil der Sonne ist natürlich völlig unsichtbar; bei einer Mondfinsterniß aber werden durch die Atmosphäre der Erde Sonnenstrahlen in den Schattenraum hineingebrochen; deßhalb ist der Halbschatten nicht dunkel und der Eintritt des Mondes in den Halbschatten kaum merklich; deßhalb verschwindet auch der Mond bei der Totalität nicht, sondern erscheint roth, weil jene gebrochenen Strahlen ihre blauen Bestandtheile in der Erdluft zurückgelassen haben. Bei totalen Sonnenfinsternissen wird es indessen ebenfalls nicht ganz Nacht, weil noch viel diffuses Licht in der Luft ist, und weil die Protuberanzen und die Corona noch leuchten; indessen werden doch helle Sterne sichtbar und treten andere Nacht- und Kälteerscheinungen in der Natur auf. Seit man die Protuberanzen bei Sonnenschein beobachten kann, bieten die Sonnenfinsternisse nur noch zur Untersuchung der Corona, zur Beobachtung etwaiger intramercuriellen Planeten und vielleicht des Zodiakallichtes astronomisches Interesse; auch benutzt man sie zu Längenbestimmungen.

6. Die Asteroiden und die Kometen.

579 Die Asteroiden sind ganz kleine Weltkörper, bis zur Staubgröße herab, die einzeln sowie in Schwärmen und Ringen um die Sonne gehen. Sie treten in 3 Arten auf, als Sternschnuppen, Feuerkugeln und Meteorite. Meteorite heißen sie, wenn sie vom Himmel niedergefallen auf der Erde gefunden werden, und zwar werden sie Meteorsteine genannt, wenn sie reich an Augit, Anorthit, Magnetkies, Chromeisen, Olivin, Quarz, aber arm an Eisen sind, Meteoreisen dagegen, wenn sie vorwiegend gediegenes Eisen enthalten, das gewöhnlich von Nickel und Kobalt

begleitet ist. Feuerkugeln heißen sie, wenn sie als roth leuchtende Kugeln von bedeutender Größe sich rasch am Himmel hinbewegen, oft einen feurigen Schweif zurücklassen, mit mehr oder weniger lauter Detonation zerplatzen, und sogar bei Tage als dunkle Wölkchen erscheinen. Sternschnuppen heißen plötzlich auftauchende, meist weiße sternartige Funken, die rasch am Himmel hinschießen und plötzlich wieder verschwinden. Die mittlere Dauer der Sternschnuppen ist $1/2$ Sec., die Länge ihrer Bahn 12—16°, ihre Höhe durchschnittlich 8 M., ihre Geschwindigkeit 4—20 M., die Zahl der täglich auf der ganzen Erde mit blosem Auge sichtbaren nach H. Newton $7\,1/2$ Millionen. Man theilt sie ein in sporadische und periodische Sternschnuppen; die ersteren erscheinen einzeln und zu beliebigen Zeiten, die letzteren in großen Schaaren zu bestimmten Zeiten und gehen von bestimmten Punkten des Himmels, Radiationspunkten aus; sie bilden Sternschnuppenringe, wenn sie wie der Auguststrom jedes Jahr auftreten, Sternschnuppenschwärme, wenn sie wie der Novemberstrom erst nach mehreren Jahren wieder sichtbar werden. Die Zahl der sichtbaren Sternschnuppen ist nach Mitternacht größer als vorher. Manche Sternschnuppenschwärme haben dieselben Bahnelemente wie bestimmte Kometen, wodurch die Meinung entstanden ist, die Sternschnuppenschwärme und Kometen seien identisch (Schiaparelli 1866).

Der größte Meteorstein scheint der von Aegos Potamos (476 v. Chr.) zu sein, der zu Plinius Zeiten noch die Größe eines Wagens hatte; das größte Meteoreisen ist die Pallasmasse (1749) in Sibirien, deren Rest 1270 Pfd. schwer in Petersburg aufbewahrt wird. Jedoch ist diese Masse zackig und voll Höhlen, die von Olivin erfüllt sind, während in Südamerika Massen von 15000^{kg} liegen und die Schweden 1871 auf der Insel Disko eine in Basalt eingewachsene Eisenmasse von ca. 25000^{kg} fanden. Manche sind in Kirchen aufbewahrt (das Ancile des Mars, die Kaaba zu Mekka, der Stein von Ensisheim), die meisten in der Wiener Sammlung nnd im British Museum. Häufig hat man die Meteorite nach der Detonation einer Feuerkugel oder (bei Tage) eines dunkeln Wölkchens niederfallen sehen; so war die Detonation von dem Falle des Ensisheimer Steines so stark, daß sie bis nach der Schweiz, Burgund und tief nach Frankreich hinein gehört wurde. Diese Detonation rührt offenbar von der Gluth her, und diese entsteht durch die Verdichtung der Luft, welche bei der ungeheuren Geschwindigkeit bis zu 30 M. sehr bedeutend ist, und bei welcher bekanntlich immer Wärme entsteht; diese Wärme ist eigentlich eine Verwandlung der lebendigen Kraft, welche der Meteorit durch den Widerstand der Luft verliert. Die Geschwindigkeit berechnet man aus dem scheinbaren Wege und der Höhe, und diese Höhe aus der Parallaxe, d. i. aus dem Bogenabstande, unter welchem eine und dieselbe Sternschnuppe 2 Beobachtern an ziemlich von einander entfernten Orten, z. B. in Rom und Civitavecchia erscheint. Hinsichtlich der Zahl der sichtbaren Sternschnuppen berechnet H. Newton in Newhaven (V. St.), daß man täglich 400 Mill. sehen würde, wenn man den ganzen Himmel gleichzeitig mit guten Fernrohren beobachten könnte. Morgens sieht man mehr Sternschnuppen, weil der Theil der Erde, für welchen die Sonne aufgeht, sich auf der Seite befindet, nach welcher sich die Erde in ihrer jährlichen Bahn bewegt, und weil in der Richtung des Voranschreitens die Erde auf mehr dieser Körper treffen muß als auf der Rück- oder Abendseite sie treffen, wo sie sich von denselben zurückzieht; da indeß dennoch auch Abends Sternschnuppen gesehen werden, muß die Geschwindigkeit derselben durchschnittlich größer als 4 M., als die der Erde sein, ja aus der Menge der Abends und Morgens eintreffenden Sternschnuppen hat man die durchschnittliche Geschw. von 6 M. berechnet. Ein Sternschnuppenschwarm, der für sich oder als Kometentheil in unser Sonnensystem hereinkommt, und dessen Bahn durch die Anziehung eines Planeten solche Veränderungen erleidet, daß zwar nicht die Lagenelemente, aber die Formelemente der Bahn in mehr kreisähnlich elliptische umgewandelt werden, und der deßhalb in kürzeren Zeiten um die Sonne kreist, erfährt hierdurch auch Veränderungen in seiner eigenen Form durch das zweite Keppler'sche Gesetz, er zieht sich enger zusammen und mehr in die Länge, welch letzteres auch schon durch verschiedene Geschwindigkeit der einzelnen Theile möglich ist; so wird ein Schwarm allmälig in einen Ring umgewandelt, wie es mit dem Augustschwarme schon geschehen ist, wodurch wir jedes Jahr vom 10.—13. August viele Sternschnuppen sehen (Laurentiusstrom). Der Novemberschwarm ist nach Leverrier erst vor 1600 Jahren in unser Sonnensystem gekommen, hat durch den Uranus eine neue, engere elliptische Bahn erhalten und kreist in 34 Jahren um die Sonne; er ist nur wenig in die Länge gezogen und nur einzelne Nachzügler oder Voreilige mögen schon die Bahn

erfüllen; die Erde kommt jedes Jahr im November durch diese Bahn, man sieht daher jedes Jahr am 13. bis 15. Nov. mehr Sternschnuppen als gewöhnlich und alle 34 Jahre (1799, 1833, 1866 und 1868) so unzählig viele, als ob ein Feuerwerk vom dem Sternbilde des Löwen (dem Radiationspunkte) aus losgebrannt würde. Indessen existiren noch manche andere Sternschnuppenschwärme, die noch weniger genau bekannt sind.

580 Die Kometen erscheinen zuerst als teleskopische Lichtnebel, welche in großer Entfernung von der Sonne, meist unvermuthet, auftauchen, mit großer Geschw. zwischen den Fixsternen nach der Sonne zu wandern, um dieselbe herum gehen und auf der anderen Seite allmälig sich entfernen und verschwinden. Viele bleiben während ihrer Sichtbarkeit teleskopische Lichtwolken, nehmen jedoch bei ihrer Annäherung an Glanz zu und bei ihrer Entfernung wieder ab; in den mit bloßen Augen sichtbaren zeigt sich dagegen allmälig ein mit der Sonnennähe an Glanz fortwährend zunehmender sternartiger Kern und entwickelt sich eine an Größe fortwährend zunehmende Lichtgarbe, der Schweif; der Kern nimmt häufig mit der Annäherung zur Sonne an Größe ab, während im Schweife lebhafte Lichtströme auftreten; bei der Entfernung von der Sonne nehmen der Glanz des Kernes und die Größe des Schweifes allmälig ab. Kern und Schweif sind demnach Nebenelemente eines Kometen, die nicht immer auftreten; die Nebelhülle oder Koma dagegen ist wesentlich. Alle Theile sind so veränderlich, daß bei einer Wiederkehr der Komet nicht an der Gestalt, sondern an den Bahnelementen erkannt wird; noch verschiedener sind die Gestalten der verschiedenen Kometen. Alle Theile sind durchsichtig, brechen und schwächen das Licht der hinter ihnen stehenden Sterne nicht; sie müssen daher von höchst lockerer und geringer Masse sein; damit stimmt die Beobachtung, daß sie sogar auf die kleinsten Trabanten, an welchen sie nahe vorbeigehen, nicht die geringste Störung ausüben, während sie selbst durch solche die stärksten Bahnveränderungen erfahren; ja man vermuthet sogar, daß die Erde unvermerkt durch Kometen oder Kometenschweife hindurch gegangen sei. Im Gegensatze zur Masse ist die Größe der Kometen ungewöhnlich bedeutend, sie sind die größten Himmelskörper, der Komet von 1843 hatte eine Länge von 30 Mill. M. Die Zahl der Kometen ist groß (nach Keppler der Zahl der Fische im Weltmeere zu vergleichen); jedoch wurden noch nicht ganz 700 (seit 468 v. Chr.) beobachtet, die älteren nur mit bloßem Auge, in neuerer Zeit vorwiegend mit dem Fernrohre; in den letzten Jahrzehnten durchschnittlich jährlich 3 bis 4; von der angegebenen Zahl sind ca. 400 teleskopisch. Die Bahnen der K. sind Ellipsen von großer Exc., größer als $1/2$, oft auch Parabeln und Hyperbeln, so daß viele K. aus dem Unendlichen (von einem anderen Fixsterne) kommen, um die Sonne gehen und auf der anderen Seite wieder ins Unendliche hinaus ziehen. Unter denen mit elliptischen Bahnen sind 10, welche öfter in der durch die Rechnung bestimmten Zeit wiedergekehrt sind und dadurch die Richtigkeit der berechneten Bahnelemente beweisen; für etwa 50 wurden so lange Umlaufzeiten berechnet, daß die Rückkehr bis jetzt nicht beobachtet werden konnte, 10 haben hyperbolische und die übrigen berechneten parabolische Bahnen. Die Richtung der Kometenbewegung ist ebenso oft rückläufig wie rechtläufig, die Neigung hat die verschiedensten Größen. Wegen der großen Exc. der ell. Bahnen kommen die K. im Perihel der Sonne sehr nahe und entfernen sich im Aphel sehr weit; daher ist ihre Geschw. sehr verschieden, steigt im Perihel bis an 100 M. und sinkt im Aphel auf wenige Meter. Da die K. nur in der Nähe der Sonne sichtbar sind und sich hier so rasch bewegen, so sehen wir sie nur kurze Zeit, höchstens einige Monate. Seit 1866 ist von Schiaparelli u. A. eine Uebereinstimmung der Bahnelemente von K. mit den Bahnelementen von Sternschnuppenschwärmen nachgewiesen worden. Hierdurch ist die Meinung entstanden, die K. seien entweder selbst Asteroidenschwärme oder Theile von solchen. Nach Zöllners (1871) Kometentheorie, die eine weitere Ausbildung der Ansichten

von Olbers und Bessel ist, bestehen indessen die Nebelhülle und der Schweif nicht aus Sternschnuppen, sondern aus unendlich feinem Dunst, der sich durch die Sonnenwärme aus den festen Theilen, die den Kern bilden, entwickelt und von der Elektricität der Sonne abgestoßen als Schweif hinter den K. strömt und durch seine eigene Elektricität leuchtet; hiermit stimmen auch die spectral-analytischen und andere optische Untersuchungen, die für starke Kerne ein continuirliches, von reflectirtem Sonnenlichte herrührendes Spectrum, für die Nebelhülle und den Schweif aber ein Dreibandenspectrum, von selbstleuchtendem Gase herrührend und dem der Kohlenstoffverbindungen ähnlich, ergeben.

Schiaparelli beobachtete (1866), daß die Bahnelemente des Augustschwarmes dieselben sind wie die des Kom. III (1862), und daß die des Novemberschwarmes übereinstimmen mit den El. des K. I (1866), wonach Weiß noch mehrere solcher Uebereinstimmungen auffand. Aus dieser Gleichheit der Elemente folgt indeß keineswegs die Identität der betreffenden Kometen mit den erwähnten Schwärmen, da dieselben in der Epoche verschieden sind, also wohl auf denselben Bahnen aber an verschiedenen Stellen derselben wandeln; außerdem sieht ein Kometenschweif eben nicht aus wie ein zerstreuter Haufen von Steinen weder durch die optischen Instrumente, noch für das blose Auge, wie ein Blick auf Fig. 285 lehrt, welche den schönen K. von Coggia (1874) darstellt. Indessen mögen doch die teleskopischen K. aus solchen Haufen zerstreuter Asteroiden bestehen; denn nachdem man am 27. Nov. 1872 einen starken Asteroidenschwarm aus einer Himmelsrichtung hatte auf die nördliche Erdhälfte zukommen sehen, vermuthete Klinkerfues, dieser Schwarm könnte nach einiger Zeit von der südlichen Seite der Erde aus in entgegengesetzter Himmelsrichtung als Komet erscheinen; er gab eine telegraphische Anweisung nach Madras, und der K. wurde am bezeichneten Orte gefunden. Hieraus und aus der erwähnten Gleichheit der Bahnelemente folgt die Wahrscheinlichkeit, daß wenigstens auch die Kerne größerer Kometen eine Art Asteroidenschwärme seien, daß die K. und die gewöhnlichen Schwärme denselben Ursprung haben, daß z. B. der Schwarm vorwiegend die größeren festen Massen eines früheren Gestirnes in weit von einander entfernte Stücke vertheilt enthält, während der Kometenkern vielleicht die kleineren Massen mit den Flüssigkeiten, die in der Kälte des Weltraumes ebenfalls fest sein müssen, in größerer Nähe vereinigt in sich faßt. Wenn nun ein solcher Körper in die Nähe der Sonne gelangt, so muß in dem luftleeren Weltraume die Sonnenwärme die verdunstungsfähigen Bestandtheile desselben in Dampf verwandeln, der wegen der geringen Gravitation des massenarmen Kernes und wegen der großen molekularen Bewegung der Gase, auf welche keine Spur von Luftdruck wirkt, sich mit großer Geschwindigkeit in einen ungeheuren Raum ausbreiten muß und nur eine verschwindend kleine Dichtigkeit annehmen kann. Dieser Dunst bildet die Nebelhülle und den Schweif; die unendliche Feinheit desselben erklärt die Durchsichtigkeit und den Mangel des Lichtbrechungsvermögens in Bart und Schweif; für den Kern folgen diese Eigenschaften aus seiner siebartigen Zusammensetzung aus zerstreuten Massen. Die ungeheure Geschwindigkeit erklärt das große Volumen der Kometen und die in denselben wahrgenommenen Strömungen, die auch der Fig. 285 entsprechen; aus der mit wachsender Annäherung an die Sonne steigenden Verdunstung erklärt sich die rasche Zunahme des Schweifes und die Abnahme des Kernes. Die Zunahme des Glanzes des Kernes erklärt sich aus der größeren Menge des in größerer Sonnennähe reflectirten Lichtes; denn der Kern leuchtet in reflectirtem Sonnenlichte, was

Fig. 285.



sowohl aus der Polarisation seines Lichtes als aus dem continuirlichen Spectrum desselben erhellt. Indessen haben nicht alle Kometenkerne ein continuirliches Spectrum, sondern manchmal nur das Dreibandenspectrum; dies erklärt sich daraus, daß in einem continuirlichen Spectrum das Licht auf alle Stellen eines langen Bandes vertheilt ist, daß also ein schwaches Licht zur hinreichenden Erhellung desselben nicht ausreicht. Im Streifen- oder Bandenspectrum dagegen ist das Licht auf einige Stellen concentrirt, wodurch auch ein schwaches Licht schon zur Erzeugung des Spectrums genügt; daher haben manche Kometenkerne, wie auch die teleskopischen Kometen häufig nur das Dreibandenspectrum, da der selbstleuchtende Dunst der Schweife natürlich auch in dem Kerne vorhanden ist. Das Selbstleuchten des Dunstes erklärt man durch die Elektricität desselben, welche in den leeren Raum bekanntlich mit sanftem Leuchten ausströmt, wie das Leuchten des Barometer-Vacuums und die Geißler'schen Röhren zeigt. Ob diese El. durch die Verdunstung erst entsteht oder ob in jedem Himmelskörper freie El. angenommen werden muß, wie die Erde freie neg. El. enthält, muß noch dahin gestellt bleiben. Die El. erklärt auch die Gestalt und die von der Sonne abgewandte Richtung des Schweifes. Die Verdunstung muß nämlich an der der Sonne zugewandten Seite des Kernes am stärksten stattfinden; daher beobachtet man lebhafte Strömungen vom Kerne nach der Sonne zu, indem immer neue Dämpfe den ausgeströmten nachfolgen. Ist nun die Sonne ebenso elektrisch wie der Dunst des Schweifes, so wird, da gleiche El. sich abstoßen, die Sonne den Dampfstrahl zurücktreiben, er muß sich in etwa parabolischer Krümmung rückwärts biegen und hinter den Kometen strömen (Fig. 285). Uebt der Komet ebenfalls eine Abstoßung aus, so kann auch ein nach der Sonne zugewandter Schweif, ein Bart, entstehen; entwickeln sich mehrere Dünste, die sich abstoßen, so können auch mehrere Schweife sich bilden, wie in dem Komet von 1842, der 2, und dem von 1741, der 6 fächerartig gestellte Schweife hatte. An den Rändern muß durch die Kälte Condensation geschehen, wodurch reflectirende Theilchen entstehen; daher findet man auch in Schweifen polarisirtes Licht. Das Zerstreuen des Dunstes im Weltraume erklärt die Abnahme des Schweifes bei der Entfernung von der Sonne, seine Verschiedenheit bei verschiedenen Wiederkehren, und die allmälige Erschöpfung desselben; Halleys Komet, der im Mittelalter die Welt in Schrecken versetzte, war bei seiner letzten Erscheinung (1835) nur teleskopisch. Ebenso können aber auch die festen Massen sich nach Kepplers Gesetzen oder von nahen Planeten angezogen zerstreuen, wodurch das völlige Verschwinden von Kometen erklärlich wird, oder ihre Umwandlung in einen Asteroidenschwarm, wie der verloren geglaubte Biela'sche Komet 1872 als Sternschnuppenschwarm wieder erschienen ist.

Merkwürdige Kometen. Die 10 K., mit berechneter und beobachteter Wiederkehr sind: 1. der Encke'sche K., Umlaufzeit 3,3 Jahre, die kürzeste von allen; die kleinste Bahn, deren Aphel noch innerhalb der Jupiterbahn; schon 19mal wiedergekehrt, aber jedesmal 2⅔ St. früher; man erklärt dies dadurch, daß die Anziehung im Verhältnisse zur lebendigen Kraft größer wird, weil die letztere durch den Widerstand des Aethers eine Verminderung erfährt. 2. Bielas K. (1826); 6,7 J. Uml.; ist dadurch merkwürdig, daß er bei der 4. Wiederkehr in 2 ziemlich gleiche Theile gespalten war, die ungefähr 40000 M. von einander abstanden, daß bei der 5. Erscheinung (1852) die 2 Theile 300000 M. von einander entfernt waren, und daß er dann ganz verschwand, bis er 1872 als Asteroidenschwarm und in Folge dessen auch als Komet wieder gesehen wurde. 3. Fayes K. (1843); Umlaufz. 7,4 J.; die kleinste Exc. = 0,55 unter allen K.; 4mal wiedergekehrt. 4. De Vicos K. (1844); Umlaufz. 5½ J.; wegen zu großer Sonnennähe nicht wieder gesehen worden. 5. Brorsens K. (1846); Uml. 5½ J.; 3mal gesehen. 5. D'Arrests K. (1851); Uml. 6½ J.; 2mal erschienen. 7. Winneckes K. (1858); Uml. 5½ J.; 1869 und 1875 erschienen. 8. Bruhns' K. (1858); Uml. 13,7 J.; 1871 beobachtet. 9. Tempels K. (1867); Uml. 5⅔ J.; 1873 wieder gesehen. 10. Halleys K.; Uml. 77 J.; der erste K., dessen Wiederkehr vorausberechnet wurde, und von dem sich dann 17 Erscheinungen von 12 v. Ch. bis 1835 nachweisen ließen. Bessel beobachtete 1835 Strömungen und Pulsationen. Andere interessante K. sind: Lexells K.; kam 1767 dem Jupiter so nahe, daß seine vorher sehr große Umlaufzeit in eine 6jährige umgewandelt wurde, ging aber nach seinem 3ten Perihel auf seiner Rückkehr 1773 an einem Jupitermond ganz nahe vorbei, ohne diesen zu stören, während er wieder eine große Umlaufzeit erhielt; hierbei kam er auch der Erde so nahe, daß er den Tag derselben um einige Sec. hätte ändern müssen, wenn seine Masse nur 1/10000 der Erdmasse betragen hätte; sein Dm. betrug ohne den Schweif 44000 M., woraus man berechnete, daß seine Dichte kleiner als 1/20000 der Luftdichte ist. — Der K. von 1811, bei Tage sichtbar, beobachtet von Olbers, gab die Grundlage zu Zeuners Theorie. — Der K. von 1843, fast nur Schweif von 30—40 M. M. Länge, trotzdem bei Tage sichtbar; der Sonne am nächsten gekommen, 100000 M. — Der K. von 1680, Schweif von 80° Länge; Aphel 18000 M. M.; Perihel 130000 M.; Geschw. zwischen 4^m und 79 M.; Exc. nahezu = 1; rückläufig. — Donatis K. (1858) glänzte

fast so hell wie Arctur, verkleinerte stark seinen Kern bei Annäherung zur Sonne; Uml. 2500 J.; hatte 2 Nebenschweife; prächtiges Gestirn. — Coggias K. (1874) (Fig. 285) entschied die vorher zweifelhaften Spectra und die Polarisation; Uml. 12000 J.

7. Chronologie.

581

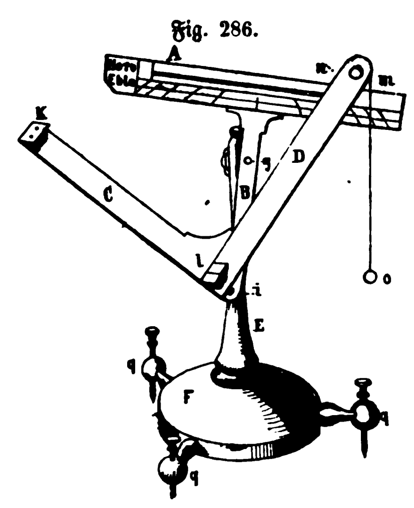
Zeitbestimmungen. Die Astronomie hat die Aufgabe, für jeden beliebigen Ort und für jede beliebige Zeit die Stellung der Himmelskörper zu berechnen, dann umgekehrt, zu finden, zu welcher Zeit ein Gestirn eine bestimmte Stellung einnimmt, wann z. B. für jeden beliebigen Ort an einem bestimmten Tage die Sonne aufgeht, culminirt, untergeht, welche Länge der Tag hat und endlich aus der Stellung eines Gestirnes die Zeit zu berechnen. Diese Aufgaben erfordern meist die Anwendung der sphärischen Trigonometrie. Eine einfachere Aufgabe ist die Beobachtung der wahren Zeit, aus der man dann durch Zufügung der Zeitgleichung die mittlere, d. i. die bürgerliche Zeit finden kann. Die Bestimmung der wahren Zeit geschieht auf ungenaue Art durch Sonnenuhren, durch Beobachtung des wahren Mittags mittels eines Gnomons, genauer durch Beobachtung der Sonnenculmination mittels eines Fernrohres, am genauesten durch Beobachtung der Culmination eines Sternes, dessen Elemente man genau kennt. Hiernach müssen selbst die genauest gehenden Uhren, die Chronometer, welche die Zeit nur durch mechanische Vorrichtungen dem Himmel nachahmen, corrigirt werden.

Die Sonnenuhr besteht aus einer zur Weltachse parallelen Linie, welche entweder durch einen Stab oder durch die obere Kante einer verticalen Messingplatte dargestellt ist und ihren Schatten auf eine horizontale oder verticale Grundplatte wirft; wegen der großen Entfernung der Sonne kann diese parallele Linie als die Weltachse selbst angesehen werden; und da die Sonne sich jeden Tag in gleicher Weise um die Weltachse dreht, jeden Tag zu derselben Zeit wieder dieselbe Stellung zur Weltachse hat, so muß auch die parallele Linie jeden Tag zu derselben Zeit ihren Schatten nach derselben Richtung werfen, so daß man aus der Stellung des Schattens die Stunde erkennen kann.

Der Gnomon oder Sonnenzeiger ist ein verticaler Stab, der durch die Länge seines Schattens die Zeit in ungenauer Weise angibt, aber den Augenblick des wahren Mittags bei guter Einrichtung ziemlich scharf anzeigt, da in diesem Augenblicke, der Zeit des höchsten Sonnenstandes, der Schatten am kürzesten ist. Berühmte Sonnenzeiger sind der Obelisk von mehr als 100′ Höhe, den Kaiser Augustus aus Aegypten nach Rom bringen ließ, der Gnomon im Dome zu Florenz (1467), bestehend aus einer in 277′ Höhe in der Kuppel angebrachten Oeffnung, durch welche ein Sonnenbildchen auf den Fußboden fiel, das wegen der großen Höhe eine starke Bewegung hatte und daher größere Genauigkeit bot; geht von der Oeffnung ein Loth herab bis auf den Boden, so gibt die Verbindungslinie von dessen Fußpunkte mit dem Sonnenbildchen auch die Mittagslinie, die Richtung des Meridians an. — Eine genauere Bestimmung des wahren Mittags ist möglich mittels eines im Meridian aufgestellten Fernrohres, des sogenannten Mittagsrohres; der Moment, in welchem die Sonne, genauer der Mittelpunkt der Sonne im Schnittpunkte des Fadenkreuzes steht, ist der wahre Mittag. Auch wenn ein Fernrohr nicht im Meridian steht, aber um eine verticale Achse drehbar ist, kann es zur Bestimmung des wahren Mittags dienen; man beobachtet die 2 Zeiten, in welchen die Sonne durch das Fernrohr geht; die Mitte derselben ist der wahre Mittag. Da aber die Sonne keine so scharfe Beobachtung der Culmination erlaubt als ein Stern, so benutzt man zur genauesten Zeitbestimmung einen Fixstern. Bekanntlich liegt der Sternzeit der Frühlingspunkt zu Grunde; bei seiner Culmination ist 0 Uhr Sternzeit; derselbe Punkt bildet aber auch den Anfangspunkt der Rectascension, welche auf dem Aeq., also in der Richtung der täglichen Bewegung der Gestirne gezählt wird; folglich hat ein Stern, der 15° Rectascension hat, also 1/24 der ganzen Drehung östlich vom Frühlingspunkte liegt, seine Culmination 1 St. später, um 1 Uhr Sternzeit; überhaupt gibt die A. R. in Graden ausgedrückt bei der Division durch 15 die Stunde an, in welcher der Stern culminirt; ja in den astronomischen Jahrbüchern oder Ephemeriden steht die A. R. gewöhnlich in St. ausgedrückt. Hat man eine solche Tabelle für einen Stern, und beobachtet man mittels des Mittagsrohres oder Passageinstrumentes den Augenblick seiner Culmination, so ist die Zeit dieses Augenblickes durch die Rectascension gegeben. Um diese in Sternzeit erhaltene Angabe in mittlere Sonnenzeit zu verwandeln, muß man die A. R. der Sonne, die ebenfalls in den Ephemeriden steht, subtrahiren, mit (365 : 366) multipliciren und die Zeitgleichung addiren. Für solche Correcturen der Uhren

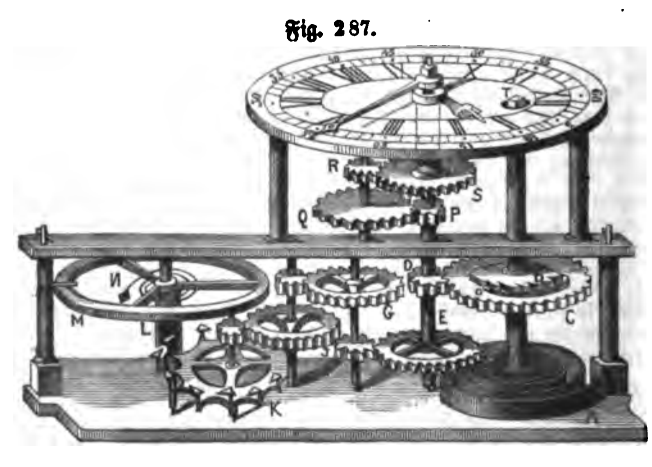
gibt es übrigens noch manche Methoden, so Dents Dipleidoskop, Steinheils Passagenprisma, den Spiegelsextant, mittels dessen man die Höhe der Sonne jeden Augenblick messen und dann aus Tabellen die entsprechende Zeit entnehmen kann. Diese Tabellen gelten aber immer nur für bestimmte Zeiten und Breiten, also sind alle angeführten Methoden für den Laien unbrauchbar. Das einfachste und für Jedermann handliche Instrument, das die Bestimmung der Zeit auf 1/2 Min. genau möglich macht, ist Ebles Horoskop, Fig. 286. Dasselbe enthält zunächst die T-Schiene AB um g drehbar, auf welcher sich oben die aus krummen Linien gebildete Stundenskala befindet; über derselben die Skala der Polabstände der Sonne, links und rechts von der Stundenskala die Polhöhenskale. In dieser sucht man die Polhöhe oder geogr. Breite des betreffenden Ortes auf und verbindet die 2 Punkte links und rechts, wie es z. B. auf dem Apparat für 50° (Mainz) geschehen ist, durch eine Gerade. Nun stellt man das Horoskop auf, dreht die T-Schiene, bis der Punkt, wo der Polabstand der Sonne des betreffenden Tages steht, senkrecht über dem Drehpunkte (unsichtbar) am unteren Ende des Schenkels B sich befindet. Alsdann dreht man die L-Schiene CD um ihre Zapfen, so daß die Sonne durch die 2 Oeffnungen des Scheibchens k Strahlen auf das Scheibchen l sendet, und daß zu beiden Seiten des Striches auf derselben kleine Sonnenbildchen stehen; dann zeigt die Stellung des Lothfadens m auf der Stundenskala die wahre Zeit an. Allerdings braucht man hierzu eine Polabstandstabelle; allein solche findet man leicht z. B. in Littrows astronomischem Kalender für jedes Jahr, in Heis' astron. Wochenschrift für jeden Monat.

Fig. 286.



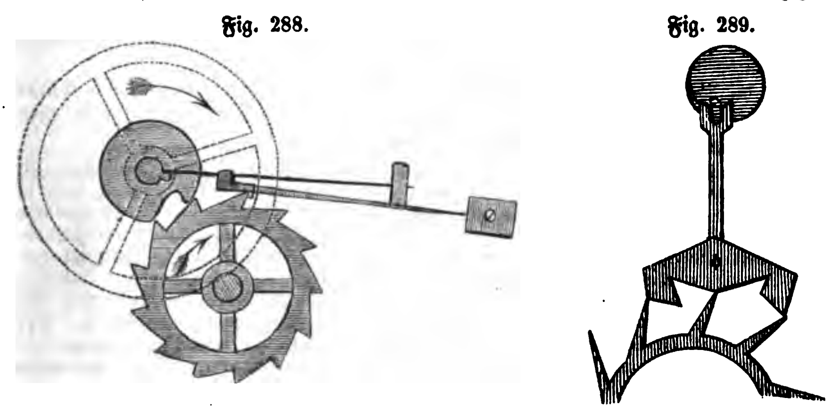
582 **Uhren und Chronometer.** Fig. 287 stellt das Werk einer Cylinderuhr vor, zu größerer Deutlichkeit etwas aus einander gerückt. A ist die Triebfeder, welche durch Umdrehen des Federstiftes T zugewunden wird, wobei das auf demselben Stifte sitzende Sperrrad B sich mit dreht und unter dem federnden Sperrhaken O hergleitet, wodurch das bekannte Schnarren beim Aufziehen entsteht. Der Sperrhaken sitzt nämlich fest auf dem Stirnrade C, das auf dem Federstifte nicht befestigt ist, aber durch das Eingreifen des Sperrhakens mitgenommen wird, wenn die gewundene Feder sich wieder aufzurollen strebt und dadurch den Federstift in entgegengesetzter Richtung dreht. Das Stirnrad greift in das Getriebe D und dreht dadurch den Zeigerstift, der an seinem Ende den Minutenzeiger trägt und unter demselben das Getriebe P; dieses greift in ein Rad mit 3 mal so viel Zähnen und das mit diesem verbundene Getriebe R in ein Rad S mit 4 mal so viel Zähnen, wodurch sich das Rad S 12mal langsamer dreht als der Zeigerstift; um dieses möglich zu machen, sitzt das Rad S auf einer hohlen Hülse, die den Zeigerstift bis unter den Minutenzeiger umgibt und den Stundenzeiger trägt. Die Federkraft muß so gehemmt und regulirt werden, daß der Zeigerstift sich in einer Stunde nur einmal dreht.

Fig. 287.



Dazu dient die Hemmung und der Regulator; früher hatte man die Spindelhemmung, in welcher zwei Flügel einer Spindel durch die Unruhe hin- und hergeschleudert wurden und gegen ein Rad des Werkes schlugen und so dieses für einen Augenblick zurücktrieben. Diese Hemmung der alten Spindeluhren machte dieselben ungenau und erforderte noch eine Regulirung der Federkraft durch Schnecke und Kette; sie ist daher durch die ruhende Hemmung der Cylinderuhren verdrängt worden. Der Zeigerstift setzt durch seine Umdrehung das Großbodenrad E, dieses durch das Getriebe F das Kleinbodenrad G und dieses durch das Getriebe H das Cylinderrad I und dieses endlich durch ein Getriebe das Hemmungsrad K in Drehung. Dasselbe trägt auf seinem Umfange kleine auf Säulchen stehende Keile von ausgesuchter Form, welche in den Cylinder L eingreifen, auf dessen Achse die Unruhe M mit der Spirale N sitzt. Wenn die Feder wirkt, drehen die Keile den Cylinder mit der Unruhe, die Spirale rollt sich zusammen, erlangt dadurch Federkraft, rollt sich wieder auf und dreht dadurch den Cylinder in umgekehrter Richtung, wobei die Keile entweichen und so das Hemmungsrad sich drehen kann, um übrigens sogleich durch Berührung des Cylinders mit einem Keile abermals gehemmt zu werden. Für noch genauere Uhren ist auch diese Hemmung noch nicht wirkungslos genug auf die Kraft der Uhr; für Chronometer benutzt man die freie Hemmung, welche entweder Federhemmung wie in Fig. 288

Fig. 288. Fig. 289.



oder Ankerhemmung wie in Fig. 289 ist. Solche Uhren, die zu astronomischen Zwecken, zur Längen- und Ortsbestimmung auf Schiffen dienen sollen, müssen auch noch Compensationen besitzen, sowie eine Einrichtung, daß während des Aufziehens die Uhr nicht still steht, z. B. zwei Gehäuse.

583 Der **Kalender** enthält die Eintheilung der Zeit; die Grundlage dieser Eintheilung ist das tropische Jahr = 365,24 222 mittleren Sonnentagen; der Julianische Kalender (Cäsar 44 v. Chr.) suchte dieser Länge gerecht zu werden, indem nach demselben alle 4 Jahre ein Schaltjahr von 366 Tagen auf 3 gewöhnliche Jahre von 365 Tagen folgte. Nach dieser Vorschrift wurden in 100 Jahren zu 100 . 365 Tagen noch 25 Tage zugefügt, während 100 Jahre doch nur 100 . 365 + 24,222 Tage enthalten; demnach waren 100 Jahre um einen Tag zu lang, weßhalb das Concil von Nicäa (325) drei Tage auszulassen anordnete. In dem folgenden Jahrtausend fuhr man nach dem Julianischen Kalender fort, wodurch im 16. Jahrhundert der kürzeste Tag auf den 11. Dezember zurückgerückt war, und wodurch bei gleichem Verfahren in weiteren 10 000 Jahren der Frühlingsanfang auf Weihnachten gefallen wäre; Papst Gregor XIII. verordnete daher, daß auf den 4. Oct. 1582 sogleich der 15. folgen sollte, daß weiter für die Zukunft jedes durch 4 theilbare Jahr ein Schaltjahr sein solle mit Ausnahme der Säcularjahre; diese sollten wieder gewöhnliche Jahre sein, jedoch abermals mit Ausnahme derjenigen, deren Säcularzahl durch 4 theilbar sei, welche wieder Schaltjahre sein sollten.

Nach dieser Verordnung, welcher indeß die protestantischen Länder erst nach und nach beitraten, und welcher Rußland und die griechische Kirche nur bezüglich des zweiten Theils beigetreten sind, sind also 1700, 1800, 1900 gewöhnliche, 1600 und 2000 dagegen Schaltjahre. Demnach enthalten 400 gregorianische Jahre 97 Schalttage; dies stimmt

sehr nahe mit der Wahrheit, weil 400 tropische Jahre 400 . 0,24222 = 96,888 Tage mehr enthalten als 400 . 365 Tage; in 400 Jahren beträgt also der Fehler nur 0,122 Tage, erst in 4000 Jahren 1 Tag; demnach muß nach 4000 Jahren noch ein Schalttag ausgelassen werden.

Die Eintheilung des Jahres in Monate und des Monates in Wochen rührt von der Dauer der 4 Mondphasen her, welche bekanntlich nach dem synodischen Monat = 29 1/2 Tagen wiederkehren; da nun 12 synodische Monate = 354 Tagen (das türkische Jahr) kein bürgerliches Jahr ausmachen, so mußten den einzelnen Monaten mehr als 29 1/2 Tage beigelegt werden, woher es kommt, daß die Mondphasen in den Monden allmälig zurück rücken.

Das Jahr der Griechen war wie das der Türken und Juden ein reines Mondenjahr, das zuerst 430 v. Chr. durch Einführung des Meton'schen Cyclus dem Sonnenjahre entsprechend umgestaltet wurde. Der Unterschied eines Mondenjahres vom tropischen Jahre beträgt 10 7/8 T., was in 19 J. 206 T. ausmacht, gerade den Betrag von 7 Mondmonaten; daher bestand der Meton'sche Cyclus darin, alle 19 Jahre 7 Mondmonate einzuschalten, so daß ein Cyclus von 19 Jahren 12 J. zu 12 und 7 J. zu 13 M. enthielt, was noch den Vorzug hatte, daß nach Ablauf des Cyclus die Mondphasen und Finsternisse wieder in denselben Zeiten erschienen, da in dieser Zeit die Mondknoten ihren chaldäischen Umlauf vollzogen haben.

Für die Bestimmung des Osterfestes und darnach aller beweglichen Feste wurde ebenfalls schon in Nicäa festgesetzt, daß dasselbe auf den ersten Sonntag nach dem ersten Vollmonde nach Frühlingsanfang fallen solle.

Der alte Kalender hatte für die Bestimmung der Jahrestage 3 Zirkel, den Sonnenzirkel, den Mondzirkel und der Römer Zinszahl. Der Sonnenzirkel ist eine Periode von 28 Jahren, nach deren Ablauf die Wochentage wieder auf die gleichen Monatstage fallen; man erhält die Nummer eines Jahres in diesem Zirkel, wenn man zu der Jahreszahl 9 addirt und die Summe durch 28 dividirt; der bleibende Rest ist der Zirkel für das Jahr. Der Sonntagsbuchstabe ist derjenige Buchstabe, der auf den ersten Sonntag fällt, wenn man den 1. Januar mit A, den 2. mit B u. s. w. bezeichnet; zählt man bis G und beginnt dann wieder mit A, so erhält jeder Sonntag denselben Buchstaben. Der Mondzirkel ist die bekannte Periode von 19 Jahren; das erste Jahr ist dasjenige, in welchem der Neumond auf den 1. Januar fällt, und die Nummer eines Jahres in diesem Zirkel heißt die güldene Zahl. Man erhält dieselbe, indem man zur Jahreszahl 1 zählt und die Summe durch 19 dividirt; der Rest ist die güldene Zahl. Der dritte Zirkel ist ganz willkürlich; man vermehrt die Jahreszahl um 3 und dividirt mit 15, so ist der Rest der Römer Zinszahl. Zur Bestimmung der Ostern dienen noch die Epakten, die das Alter des Mondes am 1. Jan. vom Neumonde an gerechnet bezeichnen; da nach 19 J. jede Monderscheinung wiederkehrt, so stellte man für jedes Jahrhundert eine Tafel von 19 Epakten für 19 güldene Zahlen auf, zählte vom 1. Januar mit Lunationsperioden von 29 1/2 Tagen und 13 Tagen bis zum Vollmonde, so erhielt man den Ostervollmond und durch den Sonntagsbuchstaben den Tag des Osterfestes.

584 Aufg. 817. Ein 120^{dm} hoher Gnomon warf zur Zeit des Sommersolstitium einen $25,5^{dm}$ langen Schatten, zur Zeit des Wintersolstitium einen solchen von $189,234^{dm}$, wie hoch stand in beiden Fällen die Sonne, und wie groß ist die Schiefe der Ekliptik (Spitz)? Aufl.: $\tang \alpha = 120 : 22,5$; $\tang \beta = 120 : 189,234$; $\varepsilon = 23^\circ 30'$. — A. 818. Die Schiefe der Ekliptik ε und die Länge l der Sonne sind gegeben; die A. R. und D. zu finden? Aufl.: $\tang a = \tang l \cos \varepsilon$, $\sin \delta = \sin l \sin \varepsilon$. — A. 819. Aus der geogr. Br. φ und der D. der Sonne die Zeit und den Ort des Sonnenaufgangs zu finden? Aufl.: Für das Azimuth des Aufganges a ist $\cos a = \cos (90 \mp \delta) \cos \varphi$, für den Stundenwinkel, d. i. den Winkel, den der Declinationskreis mit dem Meridian macht, ist $\cos s = \tang \varphi : \tang (90 \mp \delta)$; der Stundenwinkel dividirt durch 15 gibt die Zahl des Aufganges nach Mitternacht. — A. 820. Die Höhe und das Azimuth der Sonne für einen Tag zu finden, an dem die D. der Sonne δ, und für einen Ort, dessen geogr. Br. $= \varphi$ ist? Aufl.: $\sin h = \sin \varphi \sin \delta$; $\cotg a = \cotg \delta : \cos \varphi$. — A. 821. Um welche Zeit steht an einem gegebenen Orte die Sonne gerade im Westen oder Osten? Aufl.: $\cos s = \tang \delta : \tang \varphi$; die Zeit ist $s : 15$. — A. 822. Aus der Höhe und Declination der Sonne für einen gegebenen Ort die Zeit zu berechnen? Aufl.: Setzt man $90 - \delta + 90 - \varphi + 90 - h = 2w$, so ist $\cotg \frac{1}{2} s = \sqrt{[\sin w . \sin (w - 90 + h) : \sin (w - 90 + \delta) \sin (w - 90 + \varphi)]}$; die Zeit ist $s : 15$. — A. 823. Für einen gegebenen Zeitpunkt die Höhe der Sonne zu berechnen; die Zeit mal $15 = s$? Aufl.: $\cos (90 - h) = \cos (90 - \delta) \cos (90 - \varphi) + \sin (90 - \delta) \sin (90 - \varphi) \cos (180 - s)$ oder $\sin h = \sin \delta \sin \varphi - \cos \delta \cos \varphi \cos s$. — A. 824. Die Tagesdauer zu bestimmen für einen gegebenen Ort, zu einer Zeit, wo die A. R. und D.

der Sonne gegeben sind? Aufl.: $\cos {}^1/_2\, t = -\operatorname{tang} \delta \operatorname{tg} \varphi$. — A. 825. Die Tagesdauer mit Berücksichtigung der Strahlenbrechung β und des Sonnenradius ϱ zu bestimmen? Aufl.: Setzt man $^1/_2 (90 + \beta + \varrho + \delta - \varphi) = a$ und $^1/_2 (90 + \beta + \varrho - \delta + \varphi) = b$, so ergibt sich $\sin {}^1/_4\, t = \sqrt{[\sin a \sin b : \cos \delta \cos \varphi]}$. — A. 826. Die Länge des kürzesten und des längsten Tages zu finden? Aufl.: $\cos {}^1/_2 t = -\operatorname{tang} \varepsilon \operatorname{tang} \varphi$. — A. 827. Hierbei die Nebendata in 825. zu berücksichtigen. Aufl.: Ist $^1/_2 (90 + \beta + \varrho + \varphi - \varepsilon) = a$ und $^1/_2 (90 + \beta + \varrho - \varphi + \varepsilon) = b$, so ist $\sin {}^1/_4\, t = \sqrt{[\sin a \sin b : \cos \varepsilon \cos \varphi]}$. — A. 828. Die Parallaxe der Sonne ist 8,88″; der Radius der Erde 859 M.; wie groß ist die Entfernung der Sonne? Aufl.: 859 : sin 8,88″ = 20 000 000 M. — A. 829. Der mittlere scheinbare Winkeldurchmesser der Sonne ist 32′ 0, 9″; wie groß ist der Durchmesser und der Inhalt? Aufl.: 2 . 20 000 000 tang 16′ 0, 45″ = 190 000 M.; Volumen = 1 300 000 Erdinhalten.

Elfte Abtheilung.

Die Physik der Erde.

Ortsbestimmung. Die Gestalt, Größe, Masse, Dichte und Bewegung der Erde wurden in der Physik des Himmels betrachtet; der Geschichte der Erde, der Entstehung und Umbildung der Erdschichten und Gebirgmassen ist eine eigene Wissenschaft, die Geologie, gewidmet. Die Vertheilung von Land und Meer, die Gliederung der Erdoberfläche fällt der physikalischen Geographie anheim; das Ausmessen der Größe der einzelnen Theile, wie auch der ganzen Erdoberfläche gehört einer eigenen Wissenschaft, der Geodäsie. Uns erübrigt hier die Betrachtung solcher Erscheinungen, denen physikalische Ursachen zu Grunde liegen. Ein wesentliches Grundelement solcher Erscheinungen ist der Ort derselben; ein Ort auf der Erde wird bestimmt durch die geographische Breite und die geographische Länge, zu deren Grundlage sich von selbst der Aequator bietet. Die geogr. Br. ist der Bogenabstand eines Punktes von dem Aequator, auf dem Meridian des Punktes gemessen; die geogr. L. ist der Bogenabstand des Meridians eines Punktes von dem ersten Meridian der Erde auf irgend einem Parallelkreise gemessen. Leider sind verschiedene erste Meridiane aufgestellt worden, der von Ferro, der von Paris und der von Greenwich. Die Bestimmung der geogr. Breite beruht auf dem Satze: die Polhöhe (552.) ist gleich der geogr. Br.; die Bestimmung der geogr. L. darauf, daß jedes Gestirn in 24 Stunden einen Himmelsparallel von Osten nach Westen, also in 4 Minuten 1° durchläuft, daß es in 4 Min. aus dem Zenith oder dem Meridian eines Ortes zu dem eines um 4° nach Westen zu gelegenen Ortes geht, daß also demnach ein Ort um soviel Viertelsgrade von einem anderen nach Westen zu entfernt ist, als ein und dasselbe Gestirn Minuten später culminirt. Da auch die Sonne für jeden 15° weiter westlich gelegenen Ort 1 St. später culminirt, so differirt die Zeit zweier Orte für je 15° um 1 St.; umgekehrt sind zwei Orte um 15° von einander entfernt, wenn ihre Zeit um 1 St. differirt. Hat man daher ein Mittel, den Zeitunterschied zweier Orte für denselben Moment festzustellen, so hat man auch ihren Längenunterschied, den man häufig sogar in Stunden und Minuten angibt. 585

Die Messung der geogr. Br. besteht also darin, den Abstand des Himmelsnordpoles vom Nordpunkte, seinen kleinsten Abstand vom Horizont, d. i. von derjenigen Stelle desselben zu finden, wo irgend ein Stern in seiner täglichen Bewegung den Horizont tangirt; für eine angenäherte Bestimmung genügt schon die Messung der Höhe des Polarsternes mittels eines Quadranten oder Sextanten. Genauer geschieht es, indem man mit dem im Meridian aufgestellten Mittagsrohre die kleinste und die größte Höhe des Polarsternes oder irgend eines anderen Circumpolarsternes, also die Höhen mißt, in welchen der Stern durch den Meridian geht, und das arithmetische Mittel derselben nimmt. Hat man De-

clinationstafeln der Sonne zur Hand, so findet man die g. Br. auch, indem man die Höhe der Sonne mißt, von dieser die Declination abzählt und den Rest von 90° subtrahirt; denn die Höhe der Sonne setzt sich zusammen aus der Höhe des Aeq. und dem Abstande der Sonne vom Aeq., also aus der Aequatorhöhe und der Declination; demnach ist die Aequatorhöhe gleich der Sonnenhöhe weniger deren Declination; die Polhöhe ist aber das Complement der Aequatorhöhe. Hat man Declinationstafeln der Sterne zur Hand, so können diese zu einer sehr genauen Breitenbestimmung dienen. Man beobachtet nur die Zeit, in welcher ein Nichtcircumpolarstern den ersten Verticalkreis östlich und westlich vom Zenith schneidet, d. i. den Verticalkreis, der durch den Ost- und Westpunkt geht. Aus diesen 2 Zeitpunkten findet man leicht den kleinsten Abstand des Sternes vom Zenith und dann durch Addition von 90° seine Höhe; zählt man hiervon seine Declination ab, so hat man wieder die Aequatorhöhe.

Die einfachste Längenbestimmung geschieht mittels genauer Chronometer, deren Wichtigkeit z. B. für die Schifffahrt hierdurch erklärlich ist. Man geht z. B. von dem ersten Meridian mit einem auf dessen Zeit gestellten Chronometer nach Westen zu und vergleicht überall die Zeit des Chronometers mit der Zeit der berührten Orte; die Länge jedes Ortes beträgt so viele Viertelgrade, als der Zeitunterschied Minuten beträgt. Umgekehrt geht das Chronometer für jeden Ort so viel mal 4 Min. vor, als der Ort Grade weiter westlich liegt. Kommt man z. B. mit einem Londoner Chronometer in New-York an, wenn das Chronometer Mittag zeigt, so ist es in New-York erst 7 Uhr Morgens; langt man an einem folgenden Mittage seines Chronometers in San Franzisko an, so ist dort erst 4 Uhr Morgens. Würde man seine Uhr, wie es die ersten Weltumsegler thaten, immer nach der Zeit des Ortes stellen, so würde man bei weiterem Reisen nach Westen immer weiter in der Zeit zurückkommen und bei einem ganzen Umkreise um einen ganzen Tag zurück sein, so daß beim Wiederankommen in der Heimat dieselbe um einen Tag im Datum voran wäre und man so scheinbar einen Tag verloren hätte; aber nur scheinbar, weil jeder der zurückgelegten Reisetage länger war als ein wirklicher Tag und zwar immer um soviel mal 4 Min., als man Grade nach Westen zurückgelegt hat, weil also alle zusammen um 1 Tag länger waren; man hat dieselbe Zeit erlebt, nur einen Sonnenuntergang weniger. Umgekehrt wenn man von Osten der Sonne entgegen reist, wird jeder Tag um so viel mal 4 Minuten kürzer, als man Grade zurücklegt; man erlebt dann bei der völligen Reise um die Welt einen Sonnenuntergang mehr, gewinnt scheinbar einen Tag. Osteuropa, Asien sind uns in der Zeit voran, der atlantische Ocean und Amerika zurück; auf dem großen Ozean ist daher die Grenze, wo zwei um einen Tag verschiedene Monatstage auf einen Tag fallen, wo man also um einen Tag zurück oder vorankommen kann, je nach der Richtung, in der man reist.

Die hierauf beruhende Längenbestimmung ist auf Schiffen üblich; hat man ein nach Greenwicher Zeit gestelltes Chronometer und bestimmt an einem Orte von unbekannter Lage die Zeit, so beträgt die Länge soviel Viertelgrade, als der Zeitunterschied Minuten enthält. Sind die Zeitbestimmung und das Chronometer auf 1 Sec. genau, so bestimmt man den Ort auf den 240. Theil eines Grades, am Aeq. auf 450^{m}, in mittleren Breiten auf 300^{m} genau. Da das Chronometer hier nur den Zweck hat, anzugeben, welche Zeit am Anfangspunkte im Augenblicke der Zeitbestimmung stattfindet, so kann auch das Chronometer entbehrt werden, wenn man ein Mittel hat, eine und dieselbe Erscheinung an 2 Orten zu beobachten; der Zeitunterschied beider Orte mit 15 multiplicirt, gibt den Längenunterschied in Graden, oder auch der Zeitunterschied ist der Längenunterschied in Stunden. Als solche Erscheinungen können gelten: Blickfeuer d. h. Feuersignale, welche an beiden Orten gesehen werden; die Verfinsterung der Jupitermonde, deren Zeit für den Anfangspunkt man in Tabellen bei sich führt, und deren Zeit für den fraglichen Ort man dann bestimmt; eine Mondfinsterniß, wo man die Zeitmitte zwischen dem vollendeten Eintritte und Austritte ins Auge faßt; die Stellung oder scheinbare Entfernung des Mondes von gewissen Fixsternen, deren Entfernung vom Monde, wie sie im Anfangspunkte erscheint, man in Tabellen, z. B. nautical almanac bei sich führt. Die vollkommenste Längenbestimmung bis auf 1/30 Sec. genau ist erst durch die elektrische Telegraphie möglich geworden. Würde ein telegraphisches Zeichen keine Zeit erfordern, so hätte man von dem fraglichen Orte nur die Ortszeit nach dem Anfangspunkte oder umgekehrt zu telegraphiren, um in dem Zeitunterschiede auch den Längenunterschied zu erhalten. Da aber sowohl der galvanische Strom, als auch der Elektromagnetismus und die Bewegung des Ankers Zeit gebrauchen, deren Dauer man noch nicht kennt, so telegraphirt der erste Ort seine Zeit nach dem zweiten, der zweite nach dem ersten; jeder Ort bildet seinen Unterschied, und das Mittel beider ist die richtige Zeitdifferenz. Will man noch genauer verfahren, so vertauscht man beide Apparate, um Fehler, die aus kleinen Verschiedenheiten derselben herrühren, auszugleichen, ja sogar auch die beiden Telegraphisten, um die „persönliche Gleichung" derselben, die Verschiedenheit des Hörens, Auffassens, Niederdrückens der Tasten u. s. w. zu compensiren.

1. Bewegungen des Wassers.

Ebbe und Fluth (Newton 1687, Laplace 1790). Unter Ebbe und Fluth 586 versteht man das täglich zweimal erfolgende Fallen und Steigen des Meeres; dasselbe ist nicht merklich in Binnenmeeren und in solchen Meerestheilen, die durch enge und weitläufige Meeresarme mit den Weltmeeren in Verbindung stehen, wie in der Ostsee, sowie auch nicht auf hohem Weltmeere fern vom Lande. An den Küsten der Weltmeere beträgt die Fluthhöhe, das Mittel zwischen den Höhen zweier eine Ebbe begrenzenden Fluthen, durchschnittlich 1^m, etwas höher an Ost- als an Westküsten, noch höher in engen Armen der Weltmeere, wie im Canal bis 6^m, am höchsten am hinteren Ende geschlossener Buchten solcher Arme wie bei St. Malo 16^m; die Fluth verflacht sich sehr, wenn sie durch schmale Meeresengen in weite Seitenbecken tritt, erhebt sich aber wieder in engen Hinterbuchten; so ist sie an den Vorderküsten des Mittelmeeres kaum $^1/_3{}^m$, bei Venedig $1,3^m$. Ebbe und Fluth hängen mit dem Monde zusammen; dies zeigen folgende Erscheinungen: 1. die Fluthwelle geht wie der Mond jeden Tag von Osten nach Westen um die Erde, so daß sie auf offenem Meere sich durch eine westliche Strömung anzeigt, und daß die Verbindungslinien gleichzeitiger Fluthorte (Whewells Isorachien) für große Meere eine meridianale Richtung haben. 2. Die Fluth tritt durchschnittlich jeden Tag 50 Minuten später ein. 3. Die Fluth findet statt zur Zeit der oberen oder unteren Culmination des Mondes, die Ebbe zur Zeit des Auf- oder Unterganges desselben. 4. Die Hochfluthen oder Springfluthen treten zur Zeit der Syzygien, bei Neu- nnd Vollmond ein, die niedrigsten oder Nippfluthen zur Zeit der Quadraturen, beim ersten und letzten Viertel; hieraus folgt, daß auch die Sonne mitwirkt. 5. Die höchsten Fluthen finden statt, wenn die Syzygien zusammenfallen mit Perigäum und Perihelium, mit der kleinsten Entfernung des Mondes und der Sonne oder mit einer Finsterniß. 6. Die Fluth ist höher zur Zeit der Aequinoctien als in anderen Zeiten, höher im Winter als im Sommer. 7. Die Fluth nimmt mit der Entfernung vom Aequator ab und verschwindet in 65° Br. ganz.

Ebbe und Fluth sind eine Wirkung der verschiedenen Anziehung des Mondes gegen die Oberfläche und den Mittelpunkt der Erde. Der Mond ist nämlich dem nächsten Punkte der Erdoberfläche, d. i. dem, für welchen er oben culminirt, um $^1/_{60}$ näher als dem Mittelpunkte der Erde, und von dem entferntesten Punkte der Erde, d. i. für welchen er unten culminirt, um $^1/_{60}$ weiter entfernt, als von dem Mittelpunkte der Erde; folglich wird der nächste Punkt stärker angezogen als der Mittelpunkt, muß mehr nach dem Monde zu fallen als dieser, und muß sich daher, wenn dies möglich ist, vom Mittelpunkte entfernen; möglich ist es, wenn sich an diesem Punkte Meer befindet, weil das Wasser beweglich ist; es muß sich dann das Wasser vom Mittelpunkte entfernen, d. h. es muß sich heben. Ganz dasselbe geschieht auch am entferntesten Punkte; denn dieser wird schwächer angezogen als der Mittelpunkt, muß daher weniger nach dem Monde zu fallen als dieser, muß sich daher ebenfalls, wenn möglich, von diesem entfernen, d. h. dort befindliches Wasser muß sich heben. Es findet daher ein Steigen des Wassers, Fluth, statt für die 2 Punkte, für welche der Mond den höchsten und den tiefsten Stand einnimmt; zwischen diesen Stellen in der Mitte befinden sich die 2 Meridiane, für welche der Mond auf- oder untergeht; von diesen muß Wasser nach den Fluthstellen hinsinken, um dort den durch das Steigen entstehenden leeren Raum auszufüllen, das Wasser muß also an diesen Zwischenstellen fallen, hier ist Ebbe. Diese Stellen gehen in 24 Stunden um die ganze Erde, also in 6 St. bis an die Fluthstelle, in 12 St. bis an die folgende Ebbenstelle; also wechseln Ebbe und Fluth alle 6 Stunden ab. Da aber der Mond jeden Tag 50 Min. später culminirt, so muß auch die Fluth für einen und denselben Ort jeden Tag 50 Min. später eintreffen. Die Masse der Sonne übertrifft zwar die des Mondes millionenfach, aber der Unterschied ihrer Entfernung vom Mittelpunkte und von der Oberfläche beträgt nicht $^1/_{60}$ wie beim Monde, sondern nur $^1/_{25000}$; folglich ist die Verschiedenheit ihrer Anziehung gegen Mittelpunkt und Oberfläche, auf welcher ja die Fluth beruht, viel geringer als beim Monde, die Sonnenfluth ist kleiner, etwa $^1/_3$ der Mondfluth. In den Syzygien, wo die 3 Körper in einer Richtung stehen, fällt die Sonnenfluth auf dieselben Punkte wie die Mondfluth, die beiden Fluthen verstärken sich, die Fluth ist am größten; in den Quadraturen aber geht die Sonne für die Orte auf oder unter, für welche der Mond culminirt, die Sonnenebbe fällt auf die Mondfluth und schwächt diese am meisten, die Fluth ist am kleinsten. Diese Wirkungen

sind um so stärker, je näher die beiden Weltkörper der Erde kommen, und je mehr dieselben in eine Richtung mit der Erde fallen und eine solche im Laufe des Tages beibehalten; im Winter ist die Sonne der Erde näher als im Sommer, daher sind im Winter die Fluthen stärker als im Sommer; in den Aequinoctialzeiten stehen Sonne und Mond in der Nähe des Aequators und durchlaufen ihre Tageskreise in der Nähe desselben, in den Solstitialzeiten sind die Tageskreise aber oft weit aus einander. Am genauesten in einer Linie stehen die 3 Körper zu Finsternißzeiten, bewirken also starke Fluthen. Die Wirkung auf den Aequator hat eine am meisten senkrechte Richtung; für andere Orte ist die Richtung um so schiefer, je größer ihre Breite ist, wodurch Ebbe und Fluth mit der Breite abnehmen. Da das Wasser den Anziehungen nur allmälig folgen kann, so treffen alle geschilderten Wirkungen nicht auf den Zeitpunkt derselben, sondern etwas später ein.]

Aus der Ebbe und Fluth haben Kant (1754) und Mayer (1848) eine *Abnahme der Tageslänge* geschlossen, während man längere Zeit eine Zunahme derselben vermuthete. Dies letztere glaubte man aus der allmäligen Abnahme der Erdwärme folgern zu dürfen, welche in dem nahezu absolut kalten Weltraume unvermeidlich sei; diese Abnahme aber sollte eine Zusammenziehung der Erde zur Folge haben und so wegen der Unveränderlichkeit der Geschwindigkeit nach dem Gesetze der Trägheit eine Verkürzung der Rotationszeit nach sich ziehen. Nun hatten aber schon die alten Griechen die Umlaufszeiten der Planeten in Tagen angegeben; wären die Tage kürzer geworden, so müßten diese Umlaufzeiten in Tagen ausgedrückt, größer erscheinen, was nicht der Fall ist. Außerdem ist die Umlaufzeit des Mondes schon 200 v. Chr. gemessen worden und kann für alle Folgezeiten aus den Finsternissen geschlossen werden, woraus sich bekanntlich die Acceleration des Mondes ergibt, die man aus den 24000jährigen Schwankungen der Exc. der Erdbahn erklärt. Hiernach müßte die Acceleration immer dieselbe sein; wenn aber die Tageslänge sich verkürzt hätte, so müßte die Acceleration in einem jetzigen Jahrhundert größer sein, und zwar müßte die Länge des Mondes 3 Bogenminuten mehr betragen, wenn sich die Tageslänge nur um 0,01 Sec. verkürzt hätte. Da nun dies nicht der Fall ist, so hat die Tageslänge sich nicht verkürzt, die Erde hat sich nicht zusammengezogen, ihre Wärme ist constant geblieben; was sie durch Ausstrahlung verloren hat, hat sie durch die Sonnenwärme wieder gewonnen; hierauf deuten auch verschiedene meteorologische Angaben aus alter Zeit (Palästina zu Moses Zeit). Nun haben aber neue Berechnungen des Mondes von Delaunay und von Adams gezeigt, daß die Acceleration aus der Exc. berechnet um 6 Sec. kleiner ist als die Beobachtungen ergeben, daß also die Tageslänge zugenommen haben muß und zwar um 0,01197 Sec. in 2000 Jahren. Kant hatte dies schon daraus geschlossen, daß die Fluthwelle hinter dem Meridian des Mondes immer etwas zurückbleibt, also östlich von demselben steht, daß also der Mond auf diesen Wasserberg eine Anziehung nach Westen zu, entgegengesetzt der Rotationsrichtung ausübt, wodurch die Rotationszeit verlängert wird.

Auch die bis heute unerklärt gebliebenen geologischen Thatsachen des öfteren *Versenkens ganzer Continente* in das Meer und der *Eiszeiten* sind in der letzten Zeit durch die Ebbe und Fluth erklärt worden (Schmick 1869). Bekanntlich bestehen die meisten Theile der Erdrinde bis in unmeßbare Tiefen hinab aus Schichten, welche durch die Versteinerungen von Meeresthieren und Pflanzen ihre Absetzung aus Meeren beurkunden, also eine Versenkung der Continente unter das Meer unwidersprechlich machen, die man nur nothdürftigerweise durch benachbarte Hebungen, durch Auswaschungen u. s. w. erklärte. Schmicks Theorie benutzt die bekannte Wanderung des Perihels der Erde, das jetzt am 2. Jan. stattfindet und in 21000 Jahren die Ekliptik durchläuft, so daß es jetzt in den Sommer des Südens fällt und diesen dadurch um 8 Tage verkürzt. Die Sonne wirkt daher im Sommer des Südens auf die südlichen Meere längere Zeit senkrecht und aus größerer Nähe, die Sommersonnenfluthen des Südens sind stärker als die des Nordens, es gelangt daher im Sommer des Südens dorthin eine große Wassermenge, welche in unserem Sommer nicht vollständig wieder zurückkehrt, weil in diesem die Sonne im Aphel steht, und welche auch durch die Winterfluthen nicht vollständig compensirt wird. Hierdurch gelangt 5000 Jahre lang jedes Jahr etwas Wasser nach dem Süden und bewirkt dort ein allmäliges Steigen der Meere, was nicht blos durch die Beobachtung bestätigt wird, sondern auch die geringe Landmenge des Südens erklärt. In den folgenden 5000 Jahren fällt das Perihel mehr in die Aequinoctien, in dem nachfolgenden gleichen Zeitraume in unseren nördlichen Sommer; folglich wird in diesem sich in gleicher Weise die Meeresmenge des Nordens vergrößern, die nördlichen Continente großentheils überfluthen, während die des Südens neu aus den Meeren hervorgehen; demnach wiederholen sich die Versenkungen in Perioden von 21000 Jahren. Diejenige Halbkugel nun, welche vorwiegend Wasser enthält, muß schon durch die große Wärmecapacität des Wassers eine geringere Temperatur erhalten, sie muß außerdem durch die massenhaftere Verdunstung und Eisschmelzung eine größere Wärmemenge verzehren; hierdurch erklärt sich schon die größere

Kühle der Südhälfte, das Ueberwuchern des Eises am Südpole, die südliche Eiszeit. Schmick führt aber auch noch an, daß die kürzere Dauer des südlichen Sommers nicht durch die größere Sonnennähe compensirt werde, indem die Wirkung der letzteren durch die größere Sonnenferne in dem längeren Winter aufgehoben wird, daß also der kürzere Sommer und längere Winter der Südhälfte durch Jahrtausende hindurch derselben allmälig eine bedeutend niedrigere Temperatur verschaffen müssen; hierdurch erklärt sich dann ausreichend die Eiszeit des Südens, die Thatsache, daß dort in der Breite von Rom Gletscher bis ins Meer ragen. Da mit dem Wandern des Perihels auch der Ueberschuß des Winters über den Sommer nach Norden gelangt, so muß in 10000 Jahren bei uns nicht blos wieder allgemeine Ueberfluthung, sondern auch Eiszeit herrschen.

Die Meeresströme bestehen aus einem Fließen des Meerwassers nach bestimmten Richtungen. Der mächtigste Meeresstrom ist die äquatoriale Strömung, welche in den tropischen Weltmeeren von Osten nach Westen in einer Breite bis zu 45°, in einer Mächtigkeit bis zu 2000^{m} und einer Geschwindigkeit von 1^{m} stattfindet. An den Ostküsten der Continente werden sie abgelenkt und biegen nach Norden und Süden, wobei sie durch die Drehung der Erde allmälig eine Richtung nach Osten erhalten; der mächtigste dieser abgelenkten Ströme ist der Golfstrom, der in einer anfänglichen Breite von 30—40 M., aber mit allmälig zunehmender Breite und abnehmender Geschwindigkeit Wasser von einer Anfangstemperatur von 30° an die Westküsten von Europa bis nach Spitzbergen hinauf befördert. Zur Compensation fließen Polarströme nach dem Aequator hin, die durch die Drehung der Erde allmälig eine Richtung nach Westen erhalten; wichtig sind der arktische Strom, der aus dem Eismeere und der Davisstraße kommend an den Küsten von Nordamerika hinabfließt, der Humboldtstrom an den Küsten von Chile und Peru und der antarktische Strom, der sich im Süden in den atlantischen Ocean ergießt. Für die Entstehung der Meeresströme führt man mehrere Ursachen an: 1. Unterschied in der Temperatur des tropischen und des polaren Wassers. 2. Ebbe und Fluth. 3. Die in den Gegenden der Wendekreise vorherrschend nach Westen gerichteten Winde. 587

In den polaren Gegenden ist das Wasser ca. 30° kälter als in den tropischen und ist dort viel schwerer als hier; es herrscht deßhalb in den Tiefen der Polarmeere ein Ueberdruck nach den Tropen hin, vermöge dessen das Wasser in der Tiefe von den Polarmeeren nach dem Aeq. strömt; hierdurch erklärt sich, warum über Untiefen die Temperatur des Wassers so rasch nach unten abnimmt, indem der kalte Polarstrom über den Gipfel der Untiefe weggehen muß, sowie warum am Aeq. in der Tiefe das Meer oft nur eine Temp. wenig über Null zeigt; durch dieses untermeerische Vordrängen des Polarwassers und durch das rasche Verdunsten an der Oberfläche muß das Wasser am Aeq. aus der Tiefe in die Höhe kommen, kann aber seine geringere Tiefen- und polare Geschwindigkeit von Westen nach Osten nicht sofort aufgeben, bleibt deßhalb gegen die oberen angrenzenden Meerestheile scheinbar nach Westen zurück, d. h. hat eine Richtung nach Westen. Verstärkt wird diese Wirkung durch die Fluth, welche ja aus einer nach Westen fortschreitenden Welle besteht, sowie durch die Einwirkung der 2 Ostwinde, welche beiderseits an den Wendekreisen herrschen und daher das Wasser ebenfalls nach Westen treiben. Daß eine solche Wirkung möglich ist, zeigt das indische Meer, wo die im Winter und Sommer in entgegengesetzter Richtung wehenden Monsune auch entgegengesetzte Meeresströme erzeugen. Solche von Winden erzeugte Ströme nennt man Drifte.

Die Süßwasserströme. Das vom Meere verdunstende Wasser wird als Wasserdampf durch Diffusion und durch Winde auch über die Continente getragen, wird durch Abkühlung condensirt, und fällt so frei von Salzen als Süßwasser in Form von Regen, Schnee u. s. w. auf die Erde nieder, sammelt sich in Bächen, Flüssen und Strömen (s. 178.) und wird so in das Meer zurückgeführt. Ein Theil sickert auch in die Erde ein, sammelt sich in Adern, die zusammenfließend ein Wurzelsystem bilden und vereinigt als Quelle zu Tage treten. Kommt eine Quelle aus größerer Tiefe, so nimmt sie an der Erdwärme tieferer Schichten Theil und tritt als warme Quelle oder Therme zu Tage; eine solche ist auch immer Mineralquelle, d. h. enthält mineralische Stoffe in größerer Menge gelöst, obschon es auch kalte Mineralquellen gibt. Ist die Ader der Quelle zwischen Wasser nicht durchlassenden Schichten gespannt, so kommt sie als Springquell zu Tage, der auch künstlich mittels Durchbohren der oberen nicht 588

durchlassenden Schicht als artesischer Brunnen emporsprudeln kann. Intermittirende Quellen sind solche, welche abwechselnd fließen und nicht fließen; sie bestehen entweder aus einer Steinhöhlung mit einem schenkelheberartigen Ausflußkanal, oder aus einer Höhlung, in welcher Gas- oder Dampfdruck wie beim Heronsball das Wasser durch einen aufsteigenden Kanal austreibt, oder wie bei den Geisern aus einem hohen senkrechten Steinrohre, das sich von unten mit allmälig steigendem heißem Wasser ausfüllt, das dann durch von unten eindringenden Dampf unten allmälig bis zum Siedepunkte erhitzt wird, der dem großen Druck der Wassersäule nahezu entspricht, und, wenn eine von den immer aufsteigenden Dampfblasen den oberen Theil der Säule für einen Augenblick hebt, nun bei vermindertem Drucke plötzlich eine große Dampfmenge entwickelt, welche die Wassersäule hinaus schleudert.

Der Quellenbildung kommt es zu statten, wenn Adern auf eine nicht durchlassende Schicht treffen; großen Einfluß auf dieselbe hat das Material, die Lage und Neigung der Erdschichten, sowie die Witterung und die Jahreszeiten. Aus je größeren Tiefen die Quellen kommen, und je ausgedehnter ihr Wurzelsystem ist, desto unabhängiger werden sie von der Witterung; oberflächliche Quellen nehmen in trockenen Zeiten ab oder versiechen ganz. Eine Quelle ist eigentlich schon eine Therme, wenn ihre Temperatur die mittlere des Ortes übersteigt; sie ist um so heißer, aus je größerer Tiefe sie kommt. Für artesische Brunnen ist die gewöhnliche Schichtenlage die, daß eine muldenförmige, wasserdurchlassende Sand- oder Kalkschicht, die mit ihren Köpfen zu Tage tritt, zwischen 2 wasserdichten Thonschichten liegt; das auf die Köpfe fallende Tagwasser sickert in der Sandschicht bis an den tiefsten Punkt, füllt allmälig die Schicht bis an die Köpfe und gibt so den tiefsten Theilen durch den hydrostatischen Druck eine starke Spannung, welche dieselben durch ein Bohrloch nahe bis zur Höhe der Köpfe treibt. Bei intermittirenden Quellen kann die Unterbrechung auch in Sand oder Gasblasen liegen, die den Ausgang hemmen; hat dieselbe einen schenkelheberartigen Ausflußkanal und ein Reservoir, so fließt nach der Theorie des Hebers (191.) das Wasser aus, wenn es bis an die höchste Stelle des Hebers gestiegen ist, und hört erst zu fließen auf, wenn es in der Höhle bis zur Höhe der Ausflußöffnung gesunken ist. Manche Quellen führen eine große Menge Kohlendioxyd mit sich, welches über dem Spiegel in einem Behälter sich zu großem Drucke anhäufen kann; der anfänglich klare Strahl wird nach oben perlend und immer schäumender, indem unter dem geringer werdenden Drucke sich das Gas stärker und oft so stark entwickelt, daß der Strahl noch höher geschleudert wird (Sprudel in Nauheim). Die Wirksamkeit der Strokr und des kleinen Geisers auf der Insel Island, welche in regelmäßigen Zwischenzeiten Wassergarben von 10 bis 12^m Höhe ausschleudern, erklärt sich nach Mackenzie und Bunsen durch Dämpfe, welche sich vor dem Ausbruche über dem Wasserspiegel in einem unterirdischen Kessel angesammelt haben. Viel verwickelter sind die Erscheinungen am großen Geiser, der sich vermöge seines Gehaltes an gelöster Kieselsäure allmälig sein Rohr und sein oberes Ausflußbecken selbst aufbaut und durch immer höheren Bau sich erst selbst schafft und wieder vernichtet. Wegen der Höhe des Rohres kühlt sich nach einem Ausbruche das aufsteigende Wasser unter den Siedepunkt ab, erhebt sich aber durch aufsteigende Dampfblasen, die sich condensiren, in allen Schichten bis zum Siedepunkte, welcher dem Drucke der überliegenden Wassersäule entspricht; von da an fängt das Wasser an zu kochen, zuerst dünne, dann dickere Dampfblasen steigen auf, heben kleinere Wassersäulen zu „mißlungenen Eruptionen", bis die Vereinigung mehrerer Dampfblasen eine größere Wassersäule hebt, und dadurch den Druck in der Tiefe des Rohres so vermindert, daß dort plötzlich eine große Dampfmenge entsteht und das Wasser bis 40^m hoch schleudert.

589 **Die Eisströme oder Gletscher.** Mit der Höhe nimmt die Temperatur ab; folglich sind die höheren Theile hoher Gebirge so kalt, daß der dort im Winter gefallene Schnee während des Sommers nicht wegschmilzt; die Grenzlinie, oberhalb deren der Schnee das ganze Jahr den Boden bedeckt, nennt man die Schneegrenze; ihre Höhe hängt von der geogr. Br. ab, sie liegt bei zunehmender Breite immer tiefer; so ist sie am Aequator 5000^m, in Feuerland und Lappland nur — 1000^m. Doch hängt sie auch von der Menge der Niederschläge ab, liegt bei stärkeren Schneefällen tiefer; so ist sie z. B. am Südabhange des Himalaya tiefer als am Nordabhange. Die nicht schmelzende Schneemasse wird durch Regen- und Schneewasser, mit dem sie zusammenfriert, in eine körnige Masse, den Firn verwandelt, und endlich in die von der Höhe ausgehenden Thäler hineingedrängt, wo sie Eisströme

oder Gletscher bildet, die in den Thälern meilenweit und bis Tausende von Metern unter die Schneegrenze herabgehen, in einer Mächtigkeit von mehreren Hunderten von Metern die ganze Breite der Thäler erfüllend. Obwohl die Gletscher scheinbar aus compactem, prachtvoll blauem Eise bestehen, so sind sie doch körnig und von zahllosen Wasseräderchen durchzogen, und daher durch Regelation (409.) gegen Druck plastisch, füllen jede Thaländerung aus, bewegen sich als plastische Masse wie ein Strom mit einer Geschwindigkeit von 3^{cm} per Stunde das Thal hinab, und nehmen, obwohl sie bei jeder Dehnung reißen, so zu tiefen Gletscherspalten Veranlassung geben und bei einigermaßen starkem Gefälle zu Gletschercascaden zertrümmern, doch unterhalb solcher Stellen wieder compacte Form an. Die Ursache dieser Bewegung ist die Schwere und der Druck von oben, nach Anderen auch der Druck des gefrierenden und sich ausdehnenden Wassers in den Haarspalten, welches aber nur dadurch gefriert, daß nach der Theorie der Regelation der Druck den Gefrierpunkt des Eises, also auch dessen Temperatur erniedrigt, während das ringsum liegende Wasser, das durch Spalten entweichen kann, nicht gepreßt ist und daher gefrieren muß. Die Geschwindigkeit des Gletschers ist im Sommer größer als im Winter, im Bette und am Rande kleiner als in der Mitte, weßhalb quer gezogene gerade Streifen sich bald in der Mitte nach unten krumm biegen. Von den Thalwänden herabfallende Steine und Erdmassen bilden allmälig zur Thalrichtung parallele Wälle, die Seitenmoränen, aus denen bei der Vereinigung zweier oder mehrerer Gletscher Mittelmoränen entstehen, während sie am Ende des Gletschers, wo aus blauem Eisthore ein Bach hervorquillt, sich zu hügelartigen Endmoränen vereinigen (Gletschertische, Gletschermühlen, Schliffe).

Daß die Gletscher so tief unter die Schneegrenze herab, bis in die Nähe menschlicher Wohnungen gehen, liegt darin, daß sie in den Thälern weniger stark von der Sonne getroffen werden, während doch zum Schmelzen des Eises eine so große Wärmemenge nöthig ist; so reicht der Grindelwaldgletscher bis zu 1000^{m} herab. Der mächtigste Alpengletscher, das Eismeer, entsteht durch Vereinigung dreier Eisthäler, hat daher 4 Moränen; auch hat es drei Cascaden, am großartigsten ist die des unteren Endes, des glacier des bois; eine gewaltige Mittelmoräne mit colossalen Steinblöcken hat der Unteraargletscher, der durch Vereinigung der 2 Firnfelder des Schreckhorns und des Finsteraarhorns entsteht. Das Mer de glace ist mehr als 2 M. lang, 1000^{m} breit und wohl 500^{m} hoch, der untere Abhang, der glacier des bois, sieht noch wie ein Eisberg aus. Außer den Moränen sind noch die Gletschertische anzuführen, große Steinblöcke, unter denen das Eis nicht, wie sonst ringsum, schmelzen kann, und welche daher auf Eissäulen ruhen, die später prasselnd einstürzen. Dünne Platten oder dunkle Erdhaufen saugen die Wärme stärker ein, sinken daher in den Gletscher bis an sein Bette und werden dort durch den gewaltigen Druck zu feinem Staub zerrieben, der den Gletscherbach trübt; vorher schneiden sie lange Risse in das Gletscherbett, das von der Eisbewegung sonst glatt geschliffen ist. An diesen Gletscherschliffen kann man verlassene Gletscherbette erkennen. Die Bewegung der Gletscher hat man an Gegenständen und Gebäuden erkannt, die man in ihren oberen Theilen angebracht hat. So ließ Saussüre 1788 eine Leiter auf dem Col du géant zurück, welche 44 Jahre später in Stücken weit unten wieder gefunden wurde und daher jedes Jahr nahe 100^{m} zurückgelegt hatte; auch werden die gewaltigen Endmoränen öfter nach starken Schneejahren weit fortgeschoben, ein Zeichen für die Kraft des Gletschers. Umgekehrt ziehen sich in schneearmen Zeiten die Gletscherenden zurück, wie z. B. jetzt sämmtliche Schweizergletscher kleiner sind als im vorigen Jahrhundert. Die Bewegung zeigt sich auch noch darin, daß wegen der geringeren Geschwindigkeit der Ränder diese in zahllose Spalten zerklüftet sind. In der Eiszeit gingen die Gletscher bis in den Jura und nach Süddeutschland; man sieht dies nicht nur aus Gletscherschliffen, sondern auch aus Endmoränen, aus denen manche Berge der Vorschweiz bestehen, sowie aus fortgeführten Steinblöcken von Alpengranit, die sich z. B. im Jura finden. Die Kiölengletscher gingen damals, wie jetzt in Grönland, bis in das Meer herab, das Rußland und Deutschland überfluthete; von deren Enden rissen sich Eisberge los, welche norwegische Granitblöcke mit forttrugen, die lange Zeit unter dem Namen Findlinge, erratische Blöcke, Hünengräber für die Geographen ein Räthsel waren. Die Gletschermühlen, runde Gruben im Gletscherbette, welche der stürzende Gletscherbach durch umgetriebene harte Steine allmälig ausgeschliffen hat, und andere Gletscherseltsamkeiten sind im Gletschergarten zu Luzern blos gelegt.

2. Bewegungen der Erdrinde.

590 **Erdbeben** bezeichnet eine plötzliche Erschütterung der Erdrinde von innen heraus; die Bewegung ist hierbei entweder vertical, stoßartig (Erdstöße), oder sie geschieht in Wellen, oder sie ist drehend, der seltenste aber gefährlichste Fall. Die Erdbeben sind so häufig, daß wohl jeden Augenblick die Erde irgendwo erzittert; sie sind besonders häufig in vulcanischen Gegenden, aber auch in anderen nicht selten. Die Dauer beträgt meist nur wenige Secunden; die Ausdehnung ist so groß, daß der Erschütterungskreis, in dessen Mittelpunkt die Bewegung stoßartig am stärksten ist, und in welchem sich die Bewegung der Wellen nach allen Seiten fortpflanzt, schon 1000 M. Radius zeigte; indessen ist der Radius nicht derselbe nach allen Richtungen, so daß also das Material der Erdrinde von Einfluß ist. Die Geschwindigkeit der Fortpflanzung beträgt nach Humboldt 5—7 M. Dem Eintritte der Erscheinung geht häufig ein unterirdisches Rollen voraus; auch sind Erdstürze, Erdspalten, Gasausbrüche manchmal mit derselben verbunden. Am Meere zieht sich das Wasser zuerst zurück und stürzt dann weit über das Ufer hinaus.

Zur Ermittelung der Stärke und der Richtung dient das Seismometer von Cacciatore, bestehend aus einem mit Quecksilber gefüllten Gefäße, das gerade über dem Quecksilber 8 den Weltgegenden entsprechende Löcher hat, unter denen Becher stehen; aus der Stellung des Quecksilber empfangenden Bechers und der Menge desselben zieht man Schlüsse auf Richtung und Stärke. Fällt eine Stadt in den Mittelpunkt eines Erdbebens, so ist sie in einem Moment ein Schutthaufen (Lissabon 1756, Catania 1783, Caracas 1812); doch auch noch entfernt vom Mittelpunkte wirkt ein starkes Erdbeben zerstörend, weil irgend ein hoher Gegenstand sich in kürzester Zeit auf beiden Seiten eines unter demselben herlaufenden Wellenberges befindet und daher die stärksten Richtungsänderungen erleidet; dies erklärt, warum selbst auf dem Meere die Mastbäume der Schiffe zersplittern. Ueber die Ursache der Erdbeben stehen sich drei Ansichten einander gegenüber: 1. Die vulcanistische Ansicht; die täglichen Veränderungen der Lufttemperatur werden im Erdboden schon in 1m Tiefe ganz unmerklich, und in 20m Tiefe ist auch der Unterschied der Jahreszeiten ohne Einfluß; es herrscht dort immer die mittlere Temperatur des Ortes (s. Physik der Luft). Von dieser unveränderlichen Schicht an nimmt die Temperatur der Erdrinde, so weit man bis jetzt beobachten konnte, durchschnittlich für 30m um 1° zu. Hieraus folgt, daß schon in 1 Meile Tiefe eine Temperatur weit über dem Siedepunkte und in 10 M. eine Temperatur herrschen muß, in der alle bekannten Stoffe schmelzen. Wenn nun Wasser in solche Tiefen gelangt, so muß es in Dampf von sehr hoher Spannung verwandelt werden, der im Stande ist, die Erdschichten stoßweise zu heben. 2. Die neptunistische Ansicht führt hiergegen (Mohr, Gesch. der Erde) an, daß der Dampf in jeder Schicht der Erdrinde noch nicht die Temperatur für die Spannung besitze, die zur Hebung nöthig sei. Nach dieser Ansicht kann das Sickerwasser der Erdrinde besonders in Kalkschichten Höhlungen auswaschen oder auch Schichten so porös machen, daß darüber liegende Schichten einstürzen und dadurch Stöße erzeugen. 3. Die astronomische Ansicht (Falb 1869) erklärt die Erdbeben als eine Folge der Fluth des feurig-flüssigen Erdinneren, vermöge welcher die flüssige Masse als Fluthwelle gegen die feste Rinde anstoße.

591 Die **Vulcane** sind Berge, welche die Fähigkeit haben, Dampf und Rauch, Steintrümmer, Lapilli genannt, Schlamm und Asche, sowie feurig flüssige Gesteinsmassen, Lava genannt, auszustoßen. Man unterscheidet thätige und erloschene Vulcane; die thätigen tragen im Ruhestande eine Dampfsäule, die im Eruptionszustande zu einer feurigen Rauchsäule wird. Erloschene Vulcane verhalten sich ganz wie andere Berge, doch kam schon ein Wiedererwachen der Thätigkeit vor, z. B. beim Vesuv. Der Berg selbst ist gewöhnlich erst durch die vulcanischen Kräfte gebildet, meist kegelförmig und hat oben eine trichterförmige Oeffnung, Krater genannt, deren Boden im Ruhezustande aus erhärteter Lava, oft noch von dunkler Rothgluth besteht, von zahlreichen Gluthspalten durchzogen und mit kleinen Kegeln, Fumarolen genannt, versehen ist, aus deren Gipfeln Dämpfe ausströmen, die sich zu einer Dampfsäule mit einer Wolke als Krone vereinigen. Beim Herannahen einer Eruption wird die Dampfsäule dunkler, die Lavadecke hebt und senkt sich, zerbricht, Dampfblasen und Lavasäulen steigen auf, bis endlich unter brüllendem Tosen, das man oft Hunderte von Meilen

weit hört, zahllose Steinstücke bis zu 3000^{m} hoch geschleudert werden, und ein Aschenstrom bis in entfernte Länder geführt wird und den Himmel verdunkelt, während die Asche in der Nähe des Vulcans mit dem durch die vulcanische Wirkung erzeugten Regen sich zu Schlammströmen vereinigt, welche weit und breit die Cultur vergraben. Meist ergießen sich dann aus dem Krater oder aus Seitenöffnungen feurig flüssige Lavaströme von Tausenden von Graden Hitze, meilenbreit und oft mehrere Meilen lang, mit geringer Geschwindigkeit, Alles verwüstend und die Hitze noch Jahre lang in sich bergend.

Die Zahl der thätigen Vulcane wird auf 270 angegeben; sie befinden sich meist auf Inseln oder an Meeresküsten, nur 2 kommen in Innerasien vor; zu den thätigen rechnet man auch die Solfataren, welche seit Menschengedenken keine Eruption, aber ein fortdauerndes Aushauchen von Wasserdampf und Schwefelwasserstoff aus einem häufig mit Wasser erfüllten Krater darbieten. Die kleinen Vulcane sind in der Regel thätiger als die hohen, welche meist nur Asche und Schlamm auswerfen. Die ausgeworfenen Gase sind hauptsächlich Wasserdampf, Schwefeldampf, Salzsäure, Salmiak. Kohlendioxyd findet sich bei den Fumarolen, sowie bei den häufig in vulkanischen Gegenden vorkommenden Mofetten (Hundsgrotte, Todesthal). Die Asche kommt meist erst gegen Ende der Eruption zum Vorscheine und besteht wahrscheinlich aus durch aufsteigende Gasströme fein vertheilter Lava. Die Lapilli sind die Trümmer der alten Lavadecke, theils Wandbruchstücke, von Sandkorngröße bis zum Umfange großer Felsblöcke. Die Lavaströme erscheinen noch lange nach ihrem Ergusse bei Nacht als breite Gluthbänder, bei Tage in Dämpfe gehüllt; die hartgewordene Masse ergibt sich theils augit-, theils feldspathartig, von Blasenräumen durchzogen, der Form nach als Erd-, Stein- oder Glaslaven. Die Hauptmasse der letzteren ist geschmolzener Trachyt, Obsidian genannt, der durch Gasentwickelung schaumig aufgeblasen zu Bimsstein wird. Der Eruption von Vulcanen gehen gewöhnlich Erdbeben in den Gegenden der Vulcane voraus; man hält daher Erdbeben und Vulcane für Aeußerungen derselben Kraft; daher gibt es auch über die Entstehung der Vulcane verschiedene Ansichten. Nach der vulcanistischen Ansicht entstehen sie durch das feurig-flüssige Innere der Erde, und zwar entweder durch Reaction desselben gegen die Erdrinde oder durch Druck des von demselben erzeugten Wasserdampfes. Wie nämlich in der Urzeit die Erstarrungsrinde der feurig-flüssigen Erde sich immer mehr zusammenzog, dadurch Risse und Spalten bildete, deren Ränder durch den Gegendruck des zusammengepreßten Flüssigen aufwärts gebogen und dann von der herausgepreßten flüssigen Masse überschwemmt wurden, wodurch man sich die Längenform der Gebirge erklärt, so soll auch jetzt noch durch Zusammenziehung der Erde ein Druck auf das flüssige Innere ausgeübt werden und dieses dann durch die letzten Reste der einstigen Spalten, durch die vulcanischen Oeffnungen ausströmen. Doch kann auch der Druck von hochgespanntem Wasserdampfe die Vulcane erzeugen; durch feine Spalten, Wasseradern u. s. w. können größere Wassermassen an das feurig-flüssige Erdinnere gelangen und sich dort in Dampf verwandeln, der nicht so rasch wieder durch die feinen Spalten zurückströmen und dadurch die flüssige Erdmasse in den Krater hinaufdrücken kann. Die neptunistische jüngere Schule (Mohr) erklärt die Zunahme der Erdwärme nach innen wie auch die Vulcane für eine Arbeit der Sonne. Das von der Sonne gehobene Wasser sickert in Spalten, Rissen, Adern in das Erdinnere und durchsetzt in feinen Haarspalten alle Schichten; hierdurch werden die Kalkschichten allmälig zerfressen, porös, schwammig, durchhöhlt, worauf die oberen Schichten sinken und ihre dann gehemmte Arbeit in Wärme verwandeln; es wird berechnet, daß die hierdurch entstehende Wärme hinreichend sei, um Gesteinsmassen zu schmelzen und diese durch den Druck der sinkenden Schichten herauszupressen. Hiermit wird denn auch das Sinken größerer Erdtheile in Zusammenhang gebracht, während die Erhebung anderer Erdtheile dem Metamorphismus zugeschrieben wird, der allmäligen Umwandlung eines Gesteines, besonders von Kalk, durch das denselben überall durchsetzende Sickerwasser, das jedenfalls vorher schon durch anderes Gestein geflossen ist, daher andere Stoffe aufgelöst enthält und durch Vereinigung derselben mit dem Kalke neue Gesteine, Silicate aller Art und Gemenge solcher erzeugt. In solcher Weise denkt sich die jüngere neptunistische Schule die Entstehung und das allmälige Nachwachsen von Granit und anderen Urgesteinen von innen heraus und dadurch die Hebung von ganzen Gebirgen und Ländern wie z. B. Skandinaviens, Erscheinungen, für welche allerdings die vulcanistische Schule nur ungenügende Erklärungen geliefert hat. Obwohl hierdurch die vulcanistische Theorie bei Manchen an Geltung verloren hat, so ist sie dennoch in der letzten Zeit zweimal in besonders vortheilhafter Weise angewendet worden, zuerst von Falb zu einer neuen Erklärung der Erdbeben, und dann von Zöllner (1871) zu einer überraschenden Aufhellung der Geheimnisse des Erdmagnetismus. Nach Zöllner muß nämlich das feurig-flüssige Erdinnere auf unser Halbkugel wie das Meer nordöstliche Unter-

ströme und südwestliche Oberströme enthalten, in welch' letztere Zacken der Rinde hineintauchen und dadurch nordöstliche, den Diaphragmenströmen (619.) ähnliche el. Ströme hervorrufen, welche zur Erklärung der nordwestlichen Richtung der Nadel ausreichen, deren säculare Variationen in der allmäligen Aenderung der Innenfläche der Erde beruhen, deren tägliche, jährliche und plötzliche Aenderungen, sowie deren Zusammenhang mit Erdbeben, Vulcanen, Nordlichtern und Sonnenflecken ebenfalls sämmtlich ihre Erklärung finden.

Zwölfte Abtheilung.

Die Physik der Luft (Meteorologie).

1. Der Druck der Luft.

592 **Schwankungen des Luftdruckes.** a. Nach der Zeit. Der Luftdruck, der bekanntlich mittels des Barometers gemessen wird, ist nach dieser Messung auf der Höhe der Meeresoberfläche durchschnittlich gleich dem Gewichte einer Quecksilbersäule von 76^{cm} Höhe oder gleich dem Gewichte einer Wassersäule von ca. 10^{m} Höhe oder gleich 1^{kg} auf 1^{qcm}. Er rührt ursprünglich vom Gewichte der Luft her, äußert sich aber als Spannung, indem eine gewisse Anzahl von Luftmolekülen stoßend einwirkt, kann daher auch vergrößert werden, wenn zwischen die Luftmol. andere Moleküle eingeschaltet werden, die ebenfalls durch ihre fortschreitende Bewegung stoßend wirken, wenn also eine Dampfatmosphäre sich in der Luftatmosphäre verbreitet, was nach Daltons Gesetz bekanntlich in derselben Weise wie im luftleeren Raume geschehen kann. Demnach ist der Luftdruck aus dem Drucke der trockenen Luft und der Spannung des in derselben schwebenden Dampfes zusammengesetzt. Hieraus ergeben sich die Schwankungen des Luftdruckes; die Ursache derselben liegt in der Temperatur. Wenn die Temperatur steigt, so wird die Luft ausgedehnt, die über einer gewissen Fläche schwebende Luftsäule wird erhöht und muß daher oben in benachbarte Lufträume abfließen, wodurch sich das Luftgewicht über der Fläche vermindert, also der Luftdruck kleinet wird; zugleich aber wird die Dampfmenge und die Dampfspannung vermehrt, also der Luftdruck größer. Wenn dagegen die Temperatur abnimmt, so zieht sich die Luftsäule zusammen, und es strömt von den Seiten her neue Luft in den Verdünnungsraum, die Luftmenge über der Fläche wird vermehrt, der Luftdruck größer; die Dampfspannung aber wird durch Abkühlung kleiner und besonders, wenn die Abkühlung bis unter den Sättigungspunkt geht, was leicht geschehen kann, da bei niederen Temperaturen die Spannung des gesättigten Dampfes sehr klein ist; denn alsdann wird ein Theil des Dampfes condensirt, wird zu Wasserbläschen, die frei in der Luft schweben und daher keinen Druck ausüben. Jede Temperaturänderung hat daher einerseits eine Verminderung, anderseits eine Vermehrung des Luftdruckes zur Folge, welche sich jedenfalls einander vermindern, und wohl auch aufheben, aber auch das Ueberwiegen des einen wie des anderen herbeiführen können und so die Schwankungen des Luftdruckes erklären.

Man unterscheidet regelmäßige und unregelmäßige Schwankungen; die regelmäßigen zerfallen in tägliche und jährliche. Die täglichen Schwankungen sind am größten am Aequator, betragen aber auch dort höchstens 2^{mm}, und nehmen nach den Polen zu ab, sind bei uns nur noch $^{1}/_{2}{}^{mm}$ groß. Dieselben erklärt man folgendermaßen: Die geringste Lufttemperatur herrscht Morgens um Sonnenaufgang, die höchste um 2 Uhr Nachmittags; die Folge dieser höchsten Temperatur, die stärkste Auflockerung einer ganzen Luftsäule, ihr Wachsthum nach oben und ihr Abfließen nach den Seiten bedarf Zeit; folglich findet der geringste Druck der trockenen Luft Nachmittags zwischen 3 und 5, und aus analogen Gründen der stärkste Druck derselben Morgens zwischen 8 und 10 Uhr statt; im Inneren großer, trockener Continente ist deßhalb Morgens das Maximum, Nachmittags das Minimum des Barometerstandes. Wo aber soviel Wasser ist, daß die Dampfspannung zur Geltung kommt,

wie schon in Mitteleuropa, finden zwei Maxima und zwei Minima statt. Morgens beginnt unter dem Einflusse der Sonnenwärme die Verdampfung; der gebildete Dampf wirkt sofort durch seine Spannung druckvergrößernd, ohne erst in die Höhe gelangen zu müssen. Die Dampfspannung nimmt rascher zu als die erst später beginnende Verdünnung durch die Wärme und erzeugt so zwischen 9 und 11 Uhr das erste Maximum. Gegen Mittag ist die Luft mehr dampfgesättigt, die Spannung nimmt daher wenig, die Verdünnung aber rascher zu, so daß zwischen 3 und 5 Uhr ein Minimum entsteht. Von hier an fließt durch Abkühlung wieder Luft zu, die Luft wird schwerer, Verdampfung findet ebenfalls noch statt wenn auch in geringerem Grade, der Luftdruck steigt; da aber nach Einbruch der Nacht die Verdampfung aufhört und bald starker Condensation weicht, so muß die hierdurch erzeugte Verminderung des Luftdruckes sich bald darin geltend machen, daß derselbe nicht mehr steigt; so entsteht um 10 Uhr Abends ein zweites Maximum, wonach der Luftdruck durch Condensation stark abnimmt; doch macht sich gegen Morgen der Einfluß der Abkühlung geltend und bringt den Luftdruck wieder zum Wachsen, so daß Morgens um 4 Uhr ein zweites Minimum stattfindet. Das Hauptmaximum ist Morgens, das Hauptminimum Nachmittags; da die Wärme die Ursache dieser Unterschiede ist, so sind sie am Aeq. am größten, weil dort die tägliche Wärmeschwankung am größten ist. Viel wichtiger sind die jährlichen Schwankungen, dieselben sind am Aeq. am geringsten, weil dort die jährliche Wärmeschwankung am kleinsten ist. Am größten sind sie in den großen, weit vom Aeq. entfernten Continenten; so ist z. B. in Sibirien der mittlere Luftdruck im Januar 77^{cm}, im Juli 75^{cm}; diese großen Schwankungen sind leicht erklärlich. In Sibirien ist im Winter wie im Sommer der Himmel klar, daher findet im Winter die stärkste Wärmeausstrahlung nach dem kalten Weltraume statt, es entsteht eine Kälte von 30—40°, die ein Maximum des Barometerstandes zur Folge hat; im Sommer ist wegen der kurzen Nächte die Hitze sehr groß und daher der Luftdruck gering. In anderen Fällen sind die jährlichen, wie auch die unregelmäßigen Schwankungen nicht so einfach zu erklären.

593 Die unregelmäßigen Barometerschwankungen z. B. von Mitteleuropa werden in folgender Weise durch die Winde und die Wärme erklärt: Im Winter ist bei Nordostwind der höchste Barometerstand, weil dieser Wind kalte und daher schwere Luft herbeiführt; im Sommer ist die Nordostluft zwar warm, sogar heiß, doch bringt sie deßhalb eine bedeutende Dampfspannung und hohen Barometerstand hervor, der indessen die winterliche höchste Stellung nicht erreicht. Süd und Südwest sind die wärmsten Winde, haben daher einen geringen Luftdruck zur Folge; außerdem sind diese Winde sehr feucht, gelangen bei uns in kältere Gegenden und condensiren daher einen Theil ihres Wasserdampfes, wodurch die Dampfspannung vermindert wird. Bei dem Uebergange nach West und Nordwest werden die Winde schwerer, weil dieser Uebergang durch Zumischung des Nordwindes entsteht; daher findet auf der Westseite der Windrose ein Steigen des Barometers statt. Auf der Ostseite dagegen fällt das Barometer, weil die Bildung südlicherer Schattirungen des Windes durch Zumischung des leichten Südwindes entsteht. Wie im Winter der Nordostbarometerstand höher ist als im Sommer, so ist im Sommer der Südbarometerstand höher als im Winter, weil dieser Wind eine Wolkendecke bringt, die im Sommer die Sonnenwärme abhält, also größere Kühle erzeugt, im Winter aber die Erdwärme nicht hinaus läßt und daher größere Wärme hervorbringt, welche letztere Erscheinung etwas stärker als die erste ist wegen der stärkeren Condensation im Winter.

Schwankungen des Luftdruckes. b. Nach dem Ort. 1. Veränderungen des Luftdruckes auf der ebenen Erdoberfläche. Da die jetzige Meteorologie Wind und Wetter auf den Luftdruck zurückzuführen sucht und daher die Schwankungen desselben ergründen muß, und da sie die Ursachen der Wetteränderungen in den Verschiedenheiten des Luftdruckes an verschiedenen Orten zu derselben Zeit zu finden glaubt, so hat man die Schwankungen und Verschiedenheiten auf Landkarten graphisch dargestellt durch die Isobaren. Isobaren sind Verbindungslinien solcher Erdpunkte, welche entweder in einem bestimmten Zeitpunkt denselben Barometerstand haben, oder innerhalb eines gewissen Zeitraumes z. B. eines Monats denselben mittleren Barometerstand haben. Buchan hat Isobarenkarten der ganzen Erde für alle Monate des Jahres entworfen; aus denselben ist z. B. ersichtlich, daß Sibirien im Juli ein Minimum, im Winter ein Maximum des Luftdruckes besitzt, indem hier die Isobaren als geschlossene, fast concentrische Curven auftreten, welche im Sommer nach außen größere, im Winter kleinere Barometerstände angeben. Auf einer Isobarenkarte von Europa für irgend

einen Tag findet man oftmals mehrere Maxima und Minima. Zwei Punkte einer Isobare haben denselben Luftdruck, zwei Punkte benachbarter Isobaren verschiedenen Luftdruck. Den Unterschied mißt man durch den **Gradienten**, d. i. durch die Zahl der mm, um welche der Luftdruck abnimmt, wenn man auf einer zur Isobare senkrechten Graden um 1 geogr. Meile nach der nächstkleineren Isobare übergeht. Die Gradienten gehen bis zu 4^{mm}; sind die Isobaren concentrische Kreise um ein Minimum, so weisen alle Gradienten nach dem Mittelpunkt, während sie um ein Maximum radial nach außen gerichtet sind. Diese neuen Begriffe werden jetzt zur Erklärung der Windverhältnisse benutzt.

2. **Die Abnahme des Luftdruckes nach oben und die barometrische Höhenmessung.** Die Höhe der Atmosphäre ist unbekannt; die Dichte und der Druck derselben nehmen indeß so rasch nach oben hin ab, daß sie schon in einer Höhe von 12 M. unmerklich ist; indessen sind noch Sternschnuppen in Höhen von 30—50 M. gesehen worden, so daß man auch dort noch das Vorhandensein von Luft voraussetzen muß; ja manche Physiker halten sogar den Aether für eine außerordentlich verdünnte Fortsetzung unserer Luft, nehmen also die Atmosphäre als grenzenlos an. Die Abnahme der Dichte und des Druckes der Luft ist eine einfache Folge davon, daß auf höheren Luftschichten eine geringere Luftmenge ruht; diese Abnahme befolgt das Gesetz: **Wenn die Höhen in arithmetischer Progression wachsen, so nimmt der Luftdruck in geometrischer Reihe ab.**

Beweis. Es sei der Barometerstand, der ja bekanntlich den Luftdruck mißt, am Fuße einer h^m hohen Luftsäule $= b$, und in 1, 2, 3 . . . . h^m Höhe $= b_1, b_2, b_3 \ldots . b'$, so ist $b - b_1$ die Höhe der Quecksilbersäule von demselben Gewichte wie das erste Meter Luft, also ein Maß für die Dichte dieses Luftmeters; ebenso sind $b_1 - b_2, b_2 - b_3, b_3 - b_4 \ldots .$ die Dichten des 2ten, 3ten, 4ten Luftmeters. Da nun nach dem Mariotte'schen Gesetze diese Dichten sich wie die auf sie ausgeübten Druckkräfte, d. i. wie die zugehörigen Barometerstände verhalten, so ist $b - b_1 : b_1 - b_2 = b_1 : b_2$, oder nach Vertauschung der Mittelglieder $b - b_1 : b_1 = b_1 - b_2 : b_2$, woraus durch Anwendung der Summenproportion folgt $b : b_1 = b_1 : b_2$. In derselben Weise erhält man auch $b_1 : b_2 = b_2 : b_3$ und $b_2 : b_3 = b_3 : b_4$ u. s. w.; folglich ist $b : b_1 = b_1 : b_2 = b_2 : b_3 = \ldots \ldots$, womit der Satz bewiesen ist.

Dieser Satz findet seine Anwendung in der barometrischen Höhenmessung; da nämlich der Luftdruck nach oben immer kleiner wird, so wird auch der Barometerstand niedriger und zwar für 100^m Erhebung ungefähr um 1^{cm}; denn damit das Quecksilber um 1^{cm} fällt, muß man eine solche Luftsäule zurücklegen, daß deren Gewicht gleich dem von 1^{cm} Quecksilber ist, also, da die Luft 10000mal leichter als Quecksilber ist, eine Luftsäule von $10\,000^{cm} = 100^m$ Höhe. Umgekehrt wenn man sich mit dem Barometer erhoben hat und ein Sinken des Quecksilbers um 1^{cm} beobachtet, so hat man sich um 100^m erhoben. Die barometrische Höhenmessung wäre eine sehr einfache Sache, wenn die Dichte der Luft nach oben hin dieselbe bliebe; für jedes Sinken des Quecksilbers um 1^{cm} hätte man 100^m Höhe zu rechnen. Nun nimmt aber die Dichte der Luft fortwährend ab und ist deßhalb schon diese erste Stufe nicht ganz richtig berechnet; man hat daher hypsometrische Tabellen aufgestellt, in welchen die für alle nur denkbaren barometrischen Differenzen zugehörigen Höhen enthalten sind; noch genauer aber führt der eben entwickelte Satz zum Ziele. Ist der Reihenquotient der geometrischen Reihe $b_1 : b = q$, so ist das letzte Glied dieser $h+1$ Glieder umfassenden Reihe, der Barometerstand auf dem Gipfel der Luftsäule $b' = bq^h$; hieraus folgt $h = (\log b' - \log b) : \log q$. Man beobachtet also den Barometerstand b am Fuße und b' auf dem Gipfel der Höhe, so ist die Höhe gleich der Differenz der Logarithmen der Barometerstände dividirt durch $\log q$. Es handelt sich nur noch um Bestimmung des Factors $1 : \log q$, welcher, da $q = b_1 : b$, durch den Bruch $1 : (\log b_1 - \log b)$ gemessen wird; wenn b der Barometerstand am Meeresspiegel $= 76^{cm}$ ist, so ist b_1 der Barometerstand in 1^m Höhe, der nach Obigem um $0{,}01^{cm}$ geringer, also $= 75{,}99$ ist; hieraus ergibt sich leicht der Factor $1 : \log q = -18000$. Demnach ist die barometrische Höhe $h = -18\,000 (\log b' - \log b) = 18\,000 (\log b - \log b')$ Meter. Da die obige Rechnung nur eine sehr angenäherte ist, so gilt auch der Factor 18000 nur als runde Zahl. Auch gilt der Barometerstand 76^{cm} nur für 0^0; bei höherer Temperatur t wird die Dichte der Luft $1 + \alpha t$ mal kleiner, die Luftsäule also, die einem bestimmten Gewichte, einem bestimmten Barometerstande entspricht, $1 + \alpha t$ mal größer, worin α den Ausdehnungscoëff. der Luft $= 0{,}003\,665$ bedeutet; etwas genauer ist daher die Formel $h = 18\,000 (\log b - \log b') (1 + 0{,}003\,665\, t)$. Noch größere Genauigkeit erfordert eine Berücksichtigung der Verschiedenheiten

der Temperatur in der Luftsäule, der Feuchtigkeit, der Abnahme der Schwere nach oben und nach dem Aeq. zu. Außerdem muß berücksichtigt werden, daß wegen des Einflusses der oberen Luft oft an gleich hoch, aber weit aus einander gelegenen Gegenden der Barometerstand verschieden ist, wodurch für weit aus einander liegende Orte die barometrische Höhenbestimmung um 1/10 ungenau werden kann.

2. Das Licht der Luft.

594 **Die Tageshelle und die Dämmerung.** Die Tageshelle besteht darin, daß alle Theile der Atmosphäre der Tageshälfte der Erde leuchten, auch diejenigen, welche nicht direct von Sonnenstrahlen getroffen werden. Sie entsteht dadurch, daß nicht blos Staub- und Wassertheilchen und Wolken, sondern auch die Theilchen der Atmosphäre das Licht nach allen Seiten reflectiren oder zerstreuen. Eine gleiche Ursache hat die Dämmerung, die Erscheinung, daß die Luft vor Aufgang und nach Untergang der Sonne hell ist; die oberen Luftschichten und die nach der Sonne zu gelegenen Luftmassen empfangen noch Sonnenstrahlen, wenn die Sonne unter dem Horizont eines Ortes steht, und diffundiren dieselben in die unteren Luftschichten. Die astronomische Dämmerung hat ihre Grenze in dem Zeitpunkte, wo die kleinsten mit blosem Auge sichtbaren Sterne eben am Verschwinden sind, die bürgerliche Dämmerung in dem Zeitpunkte, wo das Lesen im Freien möglich ist. Durch Vergleichung des Sonnenstandes mit der astronomischen Dämmerungsgrenze hat sich ergeben, daß diese Grenze dann erreicht ist, wenn die Sonne 18° unter dem Horizont steht.

Ohne die Atmosphäre würde der Himmel auch bei Tage ganz dunkel sein, die Sterne würden bei Tage wie bei Nacht nur als leuchtende Punkte erscheinen, an jeder Stelle, die nicht von directen Sonnenstrahlen getroffen wird, würde Dunkelheit herrschen, und nach Untergang der Sonne würde sogleich völlige Nacht eintreten. Das durch reflectirtes Licht entstehende Leuchten der Atmosphäre läßt zwar die Sterne bei Tage für uns verschwinden, bringt aber allgemeine Helligkeit und die Dämmerung hervor. Daraus, daß die Dämmerung durch eine Tiefe der Sonne von 18° begrenzt ist, hat man berechnet, daß in einer Höhe von 9 M. die Atmosphäre entweder ganz aufhört oder, was wahrscheinlicher ist, wegen zu starker Verdünnung nur unmerkliches Licht reflectirt. Den parallel zum Horizont 18° unter demselben gelegten Kreis nennt man den Dämmerungskreis und die zwischen beiden Kreisen liegende Himmelszone die Dämmerungszone. Am Aequator steht der Tageskreis der Sonne auf dem Horizont senkrecht, nach den Polen zu aber bilden beide Kreise einen immer spitzeren Winkel; daher geht am Aequator die Sonne rasch durch die Dämmerungszone, braucht aber nach den Polen zu immer mehr Zeit, um bei ihrer immer schieferen Bahn vom Horizont bis zum Dämmerungskreise zu gelangen; deßhalb nimmt die Dämmerung mit der geogr. Breite zu, ist z. B. am Aeq. nur 1 St., in 45° 2 St., in 60° gar 3 St. lang; am Aeq. wird es gleich nach Sonnenuntergang dunkel, verhältnißmäßig noch viel rascher, als man aus der angegebenen Dämmerungsdauer schließen sollte; daraus folgt, daß bei der Diffusion des Lichtes doch die Unreinheiten der Atmosphäre, die Wasser- und Staubtheilchen, eine Hauptrolle spielen, da in der reinen Luft der tropischen Zone solche Theilchen nur in geringem Maße vorhanden sind. Auch ist an einem und demselben Orte die Dämmerung nicht gleich lang für alle Tage des Jahres, weil die Grade des Tageskreises eine verschiedene Länge haben und auch mit verschiedener Geschwindigkeit durchlaufen werden. So ist am Aeq. selbst die Dämmerung zur Zeit der Aequinoctien am kürzesten, zur Zeit der Solstitien am längsten; die Zeiten der kürzesten Dämmerung gehen für die nördliche Halbkugel mehr nach dem Wintersolstitium zu, und zwar um so mehr, je größer die geogr. Br. ist; so finden für Berlin die kürzesten Dämmerungen am 1. März und 12. Oct. statt. Da die längste Dämmerung für so nördliche Gegenden in die Zeit der kurzen Nächte fällt, so wird es in denselben eigentlich nie vollständig Nacht. Am Nordpole dauert die Dämmerung 100 Tage, und auch die langen Nächte der anderen polaren Gegenden werden wesentlich durch die Dämmerung verkürzt. — Die Gegendämmerung ist ein matter Lichtschein der eigentlichen Dämmerung gegenüber, herrührend von der Inflexion der Lichtstrahlen in den Schattenraum der Erde.

Die auf der Brechung des Lichtes durch die Luft beruhende astronomische und terrestrische Strahlenbrechung, Fata Morgana oder Kimmung, das Funkeln und das Schwanken der Sterne wurden in 298. betrachtet, die auf der totalen Reflexion beruhende Luftspiegelung in 299., die platte Form des Himmels und die hierdurch erzeugte Verkleinerung der Himmelserscheinungen nach dem Zenith zu in 353.

595 **Das Himmelblau und das Morgen- und Abendroth** sind Interferenzfarben, welche durch die kleinen durchsichtigen Wassertheilchen, die entweder in Form unendlich kleiner Tröpfchen oder in Form sehr kleiner Bläschen in der Luft schweben, hervorgebracht werden. Der reine Wasserdampf gibt der Luft ihre größte Klarheit und Durchsichtigkeit; ist der Wasserdampf aber zu Wasser condensirt, so erzeugt das von den kleinen Wassertheilchen reflectirte Licht durch Interferenz das Himmelblau und das durchgelassene Licht die Röthe des Himmels, vorausgesetzt, daß die Bläschen nicht über eine gewisse Größe und Menge hinausgehen, weil sie dann den Himmel um so weißlicher färben, je größer ihre Anzahl ist, und endlich das Grau des Nebels und der Wolken hervorbringen. Das Himmelblau und das Abendroth bilden die zwei Theile von Goethes Urphänomen: Jedes trübe d. i. schwach beleuchtete Medium erscheint vor Dunkel blau, vor Hell dagegen roth. Das Himmelblau und das Augenblau haben dieselbe Ursache, welche auch den blauen Anhauch ferner Berge und das Dunkelblau reiner Seen erklärt, sowie das Blau der Adern, der Rauchwölkchen u. s. w.; das Abend- und Morgenroth findet sein Gegenbild in der rothen Färbung, welche die Sonne hinter einer Dampfwolke, ein Licht hinter dem Schwaden kochenden Wassers, Cigarrendampf vor einem weißen Blatt Papier annimmt.

Früher erklärte man die beiden Erscheinungen durch die Annahme, daß die Luft vorzugsweise Blau reflectire und Roth durchlasse. Forbes entdeckte zuerst das Roth der Sonne hinter der Dampfwolke eines Locomotivenventils und beobachtete auch, daß nur in der Nähe des Ventils das Roth auftrat, daß in größerer Entfernung aber die Dampfwolke weiß und undurchsichtig erschien, und daß demnach zur Erzeugung des Roth die Größe und Menge der Dampfbläschen unter einer gewissen Grenze bleiben müsse. Clausius zeigte dann, wie das von den dünnen Häutchen der Wasserbläschen reflectirte Licht Blau erzeuge, ähnlich wie an den Seifenblasen Blau die Hauptfarbe sei. Daß der condensirte Wasserdampf die 2 Erscheinungen hervorbringt und nicht die Luft, darauf deuten die Thatsachen, daß in den mehr tropischen Gegenden, wo die Luft immer reiner wird, auch das Blau immer herrlicher und dunkler, in nördlichen Gegenden immer milchiger erscheint, daß der Himmel im Zenith schöner blau ist als am Horizont, daß im Winter das Blau weißlicher wird, daß Herbstabende das brillanteste Abendroth erzeugen, daß auf Abendroth und Morgengrau schönes Wetter folgt, während Morgenroth Regen anzeigt. Im letzten Falle ist die Luft nämlich so feucht, daß sie schon vor der durch die Sonne erzeugten Verdunstung Condensationen möglich macht, gewiß also in noch höherem Maße nach derselben. Vor dem Abendroth aber enthielt die Luft so wenig Feuchtigkeit, daß selbst die durch die ganze Tageswärme der Erde entführte Dampfmenge nur die geringe für das Abendroth nöthige Condensation herbeiführen konnte.

Brücke gab folgende Erklärung für das Urphänomen: Trübe Medien sind solche durchsichtige Stoffe, welche sehr kleine Theilchen anderer durchsichtiger Stoffe enthalten. Denken wir uns ein solches Theilchen unendlich klein und von Lichtstrahlen getroffen, so wird an der Vorderwand des Theilchens Licht reflectirt, wie auch an der Hinterwand; an der Vorderwand geschieht die Reflexion, falls das Theilchen fest ist und in Gas oder Flüssigkeit schwebt, durch ein dichteres Medium, an der Hinterwand aber durch ein dünneres Medium. Nach den Gesetzen der Reflexion wird die Welle eines an einem dichteren Medium reflectirten Strahles um eine halbe Wellenlänge durch die Reflexion verzögert, dagegen an einem dünneren Medium nicht; da hier die Vorder- und Hinterwand zusammenfallen, so fällt auf die von der Hinterwand reflectirte Welle eine andere, die von dieser um eine halbe Wellenlänge verschieden ist; hierdurch fallen Berg und Thal auf einander und heben sich dadurch auf. Wären also die Theilchen wirklich an Größe = Null, so würde alles reflectirte Licht aufgehoben, die Luft müßte dunkel erscheinen. Sind aber nun die Theilchen nicht ganz, sondern nahezu unendlich klein, so wird die von der Hinterwand reflectirte Welle von der vorderen um eine halbe Wellenlänge und um die Dicke des Theilchens abweichen. Da die blauen Strahlen die kleinsten Wellen haben, so kann diese Summe bei zunehmender Dicke der Theilchen zuerst für die blauen Strahlen eine ganze Wellenlänge ausmachen, wodurch diese Strahlen nicht mehr verlöscht, sondern verstärkt werden, während die Summe für die rothen, welche bekanntlich eine doppelt so lange Welle haben, nicht viel mehr als eine halbe Welle beträgt, wodurch dieselben noch vernichtet werden. Man sieht hieraus, daß die Theilchen, um Blau zu erzeugen, unter einer gewissen Größe bleiben müssen; denn werden sie größer, so wird auch das Roth mit den übrigen Farben entstehen, die mit dem Blau der kleinsten Theilchen sich zu Weiß vereinigen. Da die reflectirten Farben nicht durchgehen, so müssen bei dem von solchen Theilen durchgelassenen Lichte die

blauen Bestandtheile fehlen, wodurch eine orangefarbige Mischung entsteht, die das Morgen- und Abendroth erklärt.

596 **Der Regenbogen** ist ein concentrisch siebenfarbiger Kreisstreifen von etwa 41 Himmelsbogengraden Halbmesser, den man erblickt, wenn man die Sonne im Rücken und vor sich eine Regenwand hat. Der Mittelpunkt des Bogens liegt auf einer Geraden, die von der Sonne durch das Auge des Beobachters gezogen ist, also um so tiefer, je höher die Sonne steht, und im Horizont, wenn die Sonne auf- und untergeht: in diesem Falle hat der Regenbogen Halbkreisform, in allen anderen Fällen ist er kleiner als ein Halbkreis. Die Breite des Regenbogens beträgt $2^{0}20'$; die Farben sind die des Sonnenspectrums, das Violett nach innen, das Roth nach außen; die Farben sind nicht völlig getrennt, sondern decken sich theilweise. Häufig erscheint außerhalb des Regenbogens ein zweiter von matterem Glanze, umgekehrter Farbenfolge und 52^{0} Halbmesser, der Nebenregenbogen; kleinere Bogenstücke heißen Regengallen. Cartesius und Newton haben den Regenbogen vollständig durch Rechnung, Engel und Schellbach durch Zeichnung erklärt.

Der Regenbogen entsteht dadurch, daß Sonnenstrahlen auf die Tropfen der uns gegenüber stehenden Wand fallen, an der Vorderfläche eines Tropfens gebrochen in denselben eindringen, von der Hinterfläche reflectirt werden und durch die Vorderwand abermals gebrochen austreten und in das Auge gelangen. Diese Strahlen können nur dann einen zusammenhängenden Eindruck auf das Auge machen, wenn sie nicht divergent, sondern parallel in dasselbe eintreten; die Regenbogen erzeugenden Strahlen, die wirksamen Strahlen sind also diejenigen, welche parallel auf den Tropfen fallend wieder parallel aus demselben treten. Es seien ab und a'b' (Fig. 290) solche Strahlen; der Einfallswinkel, den ab mit dem Radius cbx bildet, sei $= \alpha$ und der Brechungswinkel $= \beta$; dieser Strahl wird nach f gebrochen, wo er unter dem W. β auftrifft und unter demselben W. β nach d reflectirt wird, wo, wie leicht ersichtlich, der Einfallswinkel jetzt ebenfalls β ist, und daher der Strahl de unter dem Brechungswinkel α austreten muß. Der W. $age = \delta$ ist der Winkel, den der einfallende mit dem austretenden Strahle macht, und $agc = \frac{1}{2}\delta$; da nun kcb oder 2β als Außenwinkel des $\triangle cbg$ auch gleich der Summe von cbg oder α und cgb oder $\frac{1}{2}\delta$, so ist $\frac{1}{2}\delta = 2\beta - \alpha$. Gelten für den parallelen Strahl a'b' dieselben, aber accentuirten Bezeichnungen, so ist $\frac{1}{2}\delta' = 2\beta' - \alpha'$. Wenn aber diese Strahlen wirksam sein, also parallel austreten sollen, so muß $\delta = \delta'$, also auch $2\beta - \alpha = 2\beta' - \alpha'$ sein, woraus $\alpha - \alpha' = 2(\beta' - \beta)$. Natürlich können nur solche Strahlen zusammen in ein Auge gelangen, welche ganz nahe beisammen liegen, für welche also $\alpha - \alpha'$ eine sehr kleine Differenz x, und ebenso $\beta - \beta'$ eine sehr kleine Differenz y bilden, woraus durch Substitution in die Bedingungsgleichung des Regenbogens entsteht $x = 2y$. Nun stehen aber α und β nach dem Brechungsgesetze in dem Zusammenhange $\sin\alpha = n \sin\beta$ und ebenso $\sin(\alpha + x) = n \sin(\beta + y)$, woraus durch Subtraction entsteht $\sin(\alpha + x) - \sin\alpha = n[\sin(\beta + y) - \sin\beta]$, oder nach bekannten goniometrischen Formeln $2 \sin \frac{1}{2}x \cos(\alpha + \frac{1}{2}x) = 2n \sin \frac{1}{2}y \cos(\beta + \frac{1}{2}y)$. Für sehr kleine Bogen darf statt des Sinus der Bogen gesetzt werden, und ebenso dürfen neben α und β in den Cosinussen die kleinen Summanden wegfallen; daher entsteht die Gl. $x \cos\alpha = ny \cos\beta$. Wird diese die Brechung darstellende Gl. mit der Gl. der Wirksamkeit $x = 2y$ verbunden, so ergibt sich für die Größe der wirksamen Brechung die Gl. $2\cos\alpha = n\cos\beta$ oder $4\cos^2\alpha = n^2\cos^2\beta$; addirt man hierzu die Gl. der Brechung $\sin^2\alpha = n^2\sin^2\beta$, so entsteht $4\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = n^2(\sin^2\beta + \cos^2\beta)$ oder $1 + 3\cos^2\alpha = n^2$, woraus $\cos\alpha = \sqrt{[(n^2 - 1):3]}$. Setzt man hierin den Brechungsexponent $n = 1{,}330$ für rothe und $= 1{,}343$ für violette Strahlen, so ergibt sich für erstere $\alpha = 59^{0}35'$,

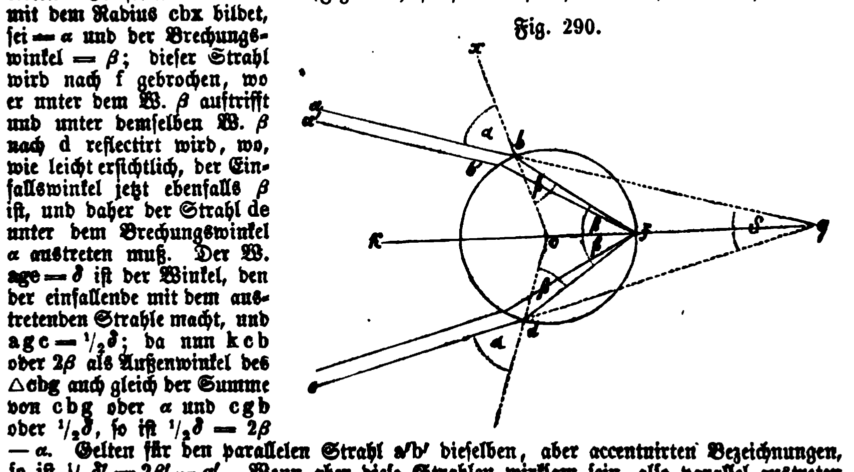


Fig. 290.

$\beta = 40^\circ 25'$, für letztere $\alpha = 58^\circ 50'$ und $\beta = 39^\circ 35'$. Hieraus folgt für die rothen Strahlen die Ablenkung $\delta = 2\beta - \alpha = 42^\circ 30'$, für die violetten $= 40^\circ 40'$, woraus die Breite des Bogens $= 1^\circ 50'$; dies ist der Mittenabstand von Roth und Violett: da jeder Streifen die Breite der Sonne $= 30'$ hat, so muß für jeden Streifen noch die Hälfte dieses Maßes hinzu, wodurch die Gesammtbreite $= 2^\circ 20'$ erfolgt. Weil die Ablenkung für die rothen Strahlen größer sein muß als für die violetten, so kommt das Roth nur von höher gelegenen, das Violett von tiefer gelegenen Strahlen ins Auge; daher ist Roth außen und Violett innen. Da alle Tropfen, welche die gleiche Lage gegen Sonne und Auge haben, auch die gleiche Ablenkung erzeugen, so entsteht Roth aus allen Tropfen, die 42° von der Verbindungslinie entfernt sind, die also auf einem Kreise liegen, dessen Radius 42° und dessen Centrum auf jener Linie sich befindet, woraus sich die Kreisform und die Größe erklärt, sowie die Thatsache, daß jeder Beobachter einen anderen Regenbogen hat. Der Nebenregenbogen entsteht durch Strahlen, welche Tropfen mehr unten treffen und nach zweimaliger Reflexion oben austreten, wodurch sich die höhere Lage und die umgekehrte Farbenstellung erklärt.

597 **Höfe, Nebensonnen, Nebenmonde.** Die Höfe sind helle, oft farbige Ringe um Sonne oder Mond, in welchen besonders an Kreuzungs- und Berührungsstellen zweier Ringe häufig hellere Lichtmassen vorkommen, Nebensonnen und Nebenmonde. Man unterscheidet kleine Höfe oder Kränze und große Höfe; die Kränze haben einen Durchmesser von 2—5°, gehen selten über 10°, enthalten auch wohl die Regenbogenfarben mit Roth auf der Außenseite, und rühren von der Beugung des Lichtes an den Nebelbläschen her, zeigen sich daher auch nur bei starker Trübung der Luft oder in einer dünnen vor Sonne und Mond stehenden Wolke. Die großen oder eigentlichen Höfe bestehen aus einem Ringe von 22° Halbmesser, nach innen roth, nach außen in bläuliches Weiß verlaufend; oft ist ein concentrischer Ring von doppeltem Halbmesser vorhanden, manchmal auch ein wagrechter durch Sonne oder Mond gehender Streifen, der eigentlich ein Stück eines horizontalen, um den ganzen Himmel ziehenden Kreises ist; manchmal findet sich über oder unter dem eigentlichen Hofe ein zweiter oder dritter Kreis, der den ersten berührt; an den Berührungs- und Schnittstellen treten, doch nur selten, Nebensonnen und Nebenmonde auf. Die großen Höfe entstehen durch Brechung des Lichtes in den sechsseitigen Eisnadeln, aus denen die höchsten Wolken bestehen.

Die kleinen Höfe sieht man häufiger am Monde als an der Sonne, weil sie neben dem grellen Lichte derselben verschwinden; beobachtet man die Sonne öfter in einem Glasspiegel oder in einer Wasserfläche, so kann man die Kränze öfter wahrnehmen; man kann sie auch nachahmen, indem man ein Licht durch eine mit Bärlappsamen bestäubte Glastafel betrachtet oder das Spiegelbild eines Lichtes in einer etwas angelaufenen, durch einen Laden verdunkelten Fensterscheibe. Fraunhofer gab die mathematische Erklärung der hierbei vorkommenden Beugungserscheinungen und fand den Zusammenhang zwischen dem Durchmesser der Nebelbläschen und dem Radius der Hofringe; so ist der Radius des rothen Ringes $r = 0{,}0000257 : d$, wo d den Durchmesser der Nebelbläschen bedeutet. Je kleiner also die Nebelbläschen sind, desto größer wird der Hof, was bei schönerem Wetter stattfindet; kleine Höfe zeigen das Vergrößern der Bläschen, also schlechtes Wetter an. — Sind die Eisnadeln, welche die großen Höfe erzeugen, sechsseitige Säulen, so bilden immer 2 einander nicht parallele Flächen ein Prisma von 60°, für welches das Minimum der Ablenkung 22° beträgt. Strahlen aber, welche das Minimum der Ablenkung bei parallelem Auftreffen erfahren, sind auch nach der Brechung parallel, verhalten sich also wie die wirksamen Strahlen des Regenbogens, wodurch sich die Form und Farbenfolge der Höfe erklärt. Durch solche Strahlen, welche durch eine Seitenfläche und eine Grundfläche der sechsseitigen Säule gehen, also durch ein Prisma von 90° brechendem Winkel, erklärt sich der doppelt so große Ring, weil das Minimum der Ablenkung für ein Eisprisma von 90° nach genauer Beobachtung 46° beträgt. Der horizontale, durch die Sonne gehende Lichtstreifen von Sonnenbreite erklärt sich durch Reflexion der Sonnenstrahlen an verticalen Wänden der Eisnadeln, und in ähnlicher Weise sind durch Brechung und Reflexion die übrigen Erscheinungen der großen Höfe zu erklären.

3. Die Wärme der Luft.

598 **Die mittleren Temperaturen.** Die Temperatur der untersten Luftschicht und der obersten Bodenschicht eines Ortes stimmen mit einander überein; sie bilden die

Temperatur eines Ortes für jeden Zeitpunkt. In der täglichen Temperaturperiode fällt das Minimum etwas vor den Aufgang der Sonne und das Maximum im Mittel auf 2 Uhr, im Sommer mehr gegen 3, im Winter mehr gegen 12 Uhr. Der Unterschied zwischen dem täglichen Maximum und Minimum ist bei uns im Winter am kleinsten (2°), im Sommer am größten (6°), bei heiterem Himmel größer als bei bedecktem. Die mittlere Temperatur eines Tages, das arithmetische Mittel aller Einzeltemperaturen wird erhalten, indem man möglichst viele in gleichen Zwischenräumen beobachtete Einzeltemperaturen addirt und die Summe durch die Zahl der Beobachtungen dividirt. Man findet dann, daß dieselbe Morgens ziemlich genau auf 9, Abends etwas schwankend auf 8 Uhr fällt, daß also das arithmetische Mittel der Temperaturen dieser beiden Zeitpunkte das Tagesmittel bildet; ziemlich genau erhält man die tägliche Mitteltemperatur auch, wenn man um 6 Uhr Morgens, 2 Uhr Nachmittags und 10 Uhr Abends beobachtet.

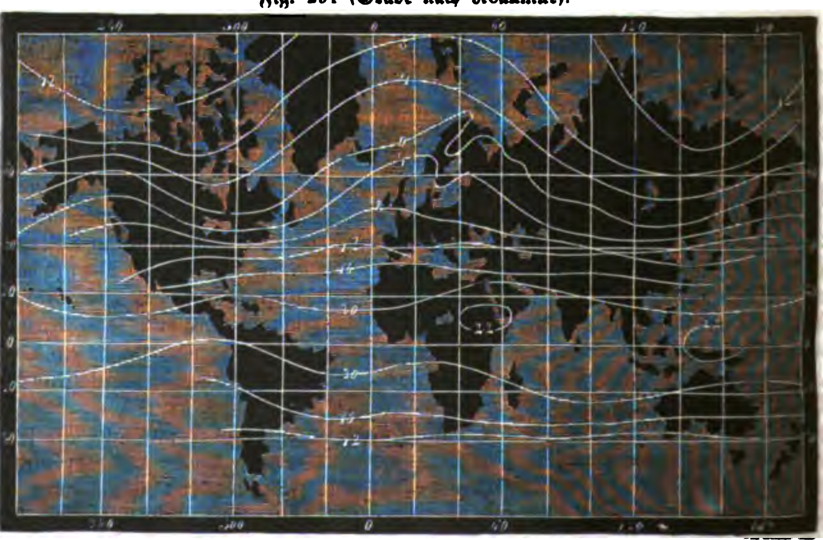
Die Temperatur der Luft ist bedingt durch die Ausstrahlnng der Erde und die Zustrahlung der Sonne; in der Nacht findet keine Zustrahlung, sondern nur Ausstrahlung statt, am Tage Ausstrahlung und Zustrahlung; beide werden durch eine Wolkendecke verkleinert. Heitere Nächte sind kühler als bedeckte, weil die Ausstrahlung der ersteren stärker ist. Die Zustrahlung ist um so größer, je höher die Sonne steht; die Ausstrahlung wächst zwar auch etwas mit der Sonnenhöhe, aber nicht so stark als jene; auch ist die Absorption bei höherem Sonnenstande kleiner. Hierdurch erklären sich die Lagen der Wendepunkte; nach Mittag hat die Zustrahlung noch längere Zeit fast dieselbe Größe, während die Ausstrahlung noch nicht so groß ist; es findet daher noch eine Zunahme statt, bis die Zustrahlung der Ausstrahlung gleich kommt. Weil im Winter die Zustrahlung überhaupt geringer ist, so ist auch der Zeitpunkt der Ausgleichung nach Mittag eher erreicht, sowie der Unterschied zwischen Maximum und Minimum kleiner.

Auch in der jährlichen Temperaturperiode fällt das Maximum nicht auf den höchsten Sonnenstand, den 21. Juni, sondern etwa 4 Wochen später, das Minimum nicht auf den tiefsten Sonnenstand, sondern in den Januar, das Mittel in die Mitte des April und des October. Man erhält die mittlere Temp. eines Monates, indem man die Summe der mittleren Temp. aller Tage durch die Zahl der Tage dividirt, und die mittlere Temp. eines Jahres, indem man die Summe der mittleren Monatstemp. durch 12 dividirt. Die mittlere Jahrestemp. ist in den Tropen und den Polarländern jedes Jahr dieselbe, in den anderen Gegenden aber geringen Schwankungen unterworfen, wodurch der Begriff der Mitteltemp. erzeugt wurde. Unter der Mitteltemp. eines Ortes versteht man die Summe möglichst vieler mittlerer Jahrestemp., dividirt durch die Anzahl der Jahre. Die Differenz der Mitteltemp. und der mittleren Jahrestemp. nennt Dove die mittlere Veränderung; Dove hat das Gesetz gefunden, daß die mittlere Veränderung nicht über eine für bestimmte Gegenden constante Grenze hinausgeht, die z. B. für Norddeutschland 1,73° beträgt, sodann daß der Unterschied zwischen den einzelnen Monatstemp. und der Mitteltemp. in unserem Herbst und Winter weniger stark schwankt als im Frühling und Sommer, daß unser Winterhalbjahr ruhiger als das Sommerhalbjahr verläuft, daß „die Natur im Herbste ruhig einschlummert, aber fieberhaft im Frühjahr erwacht“. Die Mitteltemp. eines Ortes gibt zwar einen Maßstab für die Wärmemenge, welche ein Ort durchschnittlich jährlich von der Sonne empfängt, aber kein Bild von dem jährlichen Verlaufe der Wärmeverhältnisse, von dem Klima des Ortes; denn 2 Orte können gleiche Mitteltemp. dadurch erhalten, daß der eine heiße Sommer und kalte Winter, der andere kühle Sommer und gelinde Winter hat, wodurch die Begriffe der mittleren Sommertemp. und der mittleren Wintertemp. nöthig werden; auch können 2 Orte gleiche mittlere Sommertemp. aber ungleiche Mitteltemp. besitzen, indem in dem einen gelinde, in dem anderen kalte Winter stattfinden, oder 2 Orte können gleiche Wintertemp. und doch ungleiche Mitteltemp. dadurch erhalten, daß sie verschiedene Sommertemp. genießen. — Nach oben nimmt die Temp. für 200^m Höhe um 1° durchschnittlich ab.

Der Grund, daß die jährlichen Maxima und Minima nicht auf die Solstitien, sondern fast 1 Monat später fallen, liegt darin, daß nach dem 21. Juni die Insolation noch lange größer bleibt als die Ausstrahlung, während nach dem 21. Dez. die Insolation noch lange kleiner ist als die Ausstrahlung. Die Mitteltemp. am Aeq. ist ungefähr 28°, die von Mainz 11°, von Berlin 8,88°. Hiernach könnte die mittlere Temp. eines Jahres für Berlin nicht über 10,61° und nicht unter 7,15° gehen. Irland hat dieselbe Mitteltemp. wie das Rheingau; doch gedeiht dort wegen des milden Winters die Myrthe im Freien, die in unserem kalten Winter erfriert, während unser heißer Sommer zu dem köstlichsten Weine die Traube reift, die dort in dem kühlen Sommer gar nicht gedeiht. Irkutzk hat eine viel niedrigere Mitteltemp. als wir und doch einen heißeren Sommer, der Roggen und Weizen reift, während der Boden einige Fuße unter der Oberfläche ewig gefroren ist und die Wintertemp. unter — 30° geht. Unser Rheingau hat mit manchen norwegischen Orten gleiche Wintertemp., aber doch eine höhere Mitteltemp., weil unser Sommer heißer ist als der dortige. Der verhältnißmäßig ruhigere Verlauf des Winterhalbjahres liegt nach Dove in der größeren spec. Wärme und Dampfwärme des Wassers; zu dieser Zeit steht die Sonne über der südlichen Halbkugel und bescheint hierdurch vorwiegend Wasser, dessen Temp. sich bekanntlich durch gleiche Wärmeaufnahme weniger erhöht und durch gleiche Wärmeabgabe weniger abkühlt als Land, und das außerdem etwa überschüssige Wärme zur Dampfbildung verzehrt, wodurch die Schwankungen der Temp. weniger stark als die des Landes sind, dessen spec. Wärme mehr als 2mal kleiner ist. Indessen sind die absoluten Schwankungen, die Differenzen zwischen der höchsten und der tiefsten Temp. im Winter doch größer als im Sommer. — Die Abnahme der Temp. nach oben hat mehrere Gründe: die dünnere Luft läßt die Wärme leichter durch, absorbirt weniger von derselben; sie ist weiter entfernt von der Erdoberfläche, welche es eigentlich ist, die durch Reflexion und Ausstrahlung die Luft erwärmt und daher mehr auf die nächsten Schichten wirkt; die aufsteigende erwärmt Luft dehnt sich aus und verbraucht hierdurch ihre Wärme, kühlt sich ab.

599 **Die Isothermen.** Die Aufzählung verschiedener Orte mit Anführung ihrer geographischen Lage und ihrer Mitteltemp. gibt zwar für diese Orte ein Maß für die Wärme, die sie verhältnißmäßig von der Sonne empfangen, aber kein Bild von der Vertheilung der Sonnenwärme auf Erden; ein solches gewähren aber die von Humboldt eingeführten Isothermen. Gewöhnlich versteht man unter Isothermen diejenigen Linien, welche Orte gleicher Mitteltemp. verbinden (Fig. 291); doch gibt es

Fig. 291 (Grade nach Réaumur).



auch Monatsisothermen, die von Dove eingeführt wurden und welche Orte verbinden, die gleiche Mitteltemp. für einen bestimmten Monat haben. Die Isothermen geben zwar ein Bild für die durchschnittliche Vertheilung der Wärme auf der Erde, die

Monatsisothermen aber, obwohl der Ueberblick durch die 12 Karten etwas gestört ist, zugleich eine Uebersicht des jährlichen Verlaufes der Wärmeverhältnisse jedes Ortes der ganzen Erde, was Humboldt schon angestrebt hatte durch Einführung der Isotheren und Isochimenen, der Linien gleicher mittlerer Sommerwärme und gleicher mittlerer Winterkälte. Aus dem Verlaufe dieser Linien ergeben sich folgende Gesetze über die Vertheilung der Sonnenwärme: 1. Die Wärme eines Ortes hängt hauptsächlich von seiner Entfernung vom Aeq. ab; denn die Isothermen sind im Allgemeinen dem Aeq. parallel und gehören einer um so geringeren Temp. an, je weiter sie vom Aeq. entfernt sind. 2. Die Westküsten der großen Continente erhalten bedeutend mehr und die Ostküsten wenig mehr Wärme als das Innere derselben, die Westküsten also bedeutend mehr als die Ostküsten; denn die Isothermen neigen sich an den Westküsten stark nach den Polen zu, fallen im Inneren der Continente bedeutend nach dem Aeq. hin und erheben sich an den Ostküsten ein wenig. 3. Die Küstenländer haben kühle Sommer und milde Winter, die Binnenländer der Continente heiße Sommer und kalte Winter, so daß man Seeklima und Continentalklima unterscheidet; denn die Isochimenen sowohl als die winterlichen Monatsisothermen steigen in dem Weltmeere in die Höhe und sinken im Inneren der Continente bedeutend herab, während die Isotheren und die sommerlichen Monatsisothermen im Inneren der Continente sich nach den Polen zu, in den Weltmeeren nach dem Aeq. zu biegen. 4. Europa hat eine größere Wärme als alle in gleicher Breite liegende Theile der Erde; denn seine Isothermen erheben sich besonders hoch, die Isochimenen steigen steil nach Norden zu und die Isotheren biegen sich nicht weit herab.

Am Aeq. geht die Mitteltemperatur über 25° hinaus, da die Isothermen von 25° denselben nur an wenigen Stellen schneiden und sonst 10—20° von demselben entfernt sind; die nächsten Isothermen, sowohl die jährlichen als die monatlichen laufen aber dem Aeq. ziemlich parallel und die letzteren, sowie die Isotheren und die Isochimenen zeigen wenig Unterschiede, wodurch die Gleichmäßigkeit des tropischen Klimas ausgesprochen ist. In der gemäßigten Zone aber steigen und fallen die Isothermen stark; so geht die Isotherme von 10° am Westende des großen Oceans von Jeso nach Peking, fällt noch etwas in Innerasien, zieht aber dann ziemlich westlich nach Astrachan, erhebt sich danach über Odessa, Wien und Brüssel nach London und Dublin, erreicht ihren Gipfel etwas westlich von Dublin im Meere, biegt sich endlich stark südwärts bis nach Boston hin und bis zum unteren Rande des Seenkranzes herab, um sich dann ein wenig bis nach Vancouvers Island zu erheben und ziemlich eben durch den großen Ocean zu ziehen. Demnach haben Orte wie Peking und Boston, die so südlich wie Palermo und Neapel liegen, nur die Mitteltemp. von Dublin, das 10° also 150 M. weiter nördlich gelegen ist. Noch stärker ist der Unterschied bei der Isotherme von 0°, die durch das Nordcap und Irkutzk, 25° von einander entfernt, sowie durch Alaschka und Canada, 15° von einander entfernt, hindurchzieht. In diesen Zahlen ist auch die besondere Begünstigung von Europa enthalten, welche indessen bei einem Blicke auf die Isothermenkarte deutlich in die Augen springt, sowie auch der Unterschied zwischen Land- und Seeklima. Dieser tritt jedoch deutlicher hervor bei der Betrachtung der Isotheren und Isochimenen, oder der Monatsisothermen des Juli und Januar. Die ersteren der beiden Paare steigen im Inneren der Continente, zeigen also die heißeren Sommer derselben und die kühleren der Küstenländer, die letzteren dagegen steigen an den Küsten und fallen im Inneren tief herab, und bekunden dadurch die milden Winter des Meeres und die harten Winter des Inneren der Continente. So hat Irkutzk bei einer jährlichen Mitteltemp. von 0° eine mittlere Sommerwärme von 18°, aber eine mittlere Winterkälte von — 18°, während das Nordcap bei gleicher Mitteltemp. nur eine Sommerwärme von 5°, dafür aber auch nur eine Winterkälte von — 5° besitzt. Je weiter ein Ort von der Küste entfernt ist, desto weniger empfindet er die Mäßigung des Seeklimas, desto mehr verfällt er der Härte des Continentalklimas. Dies zeigen z. B. deutlich die Monatsisoth. von Wien: im Januar und Februar liegt Wien auf der Isoth. von 0° mit Reykjavig auf Island, im März auf gleicher Isoth. von 5° mit Brüssel und Edinburg; im April verbindet die Isoth. von 10° Wien mit Paris und Brest, im Mai die von 15° mit La Rochelle; im Juni geht die Isoth. von 18° über Wien nach Mailand zu den Pyrenäen, im Juli und August gar die von 20° von Wien nach den Azoren; im Sept. steht Wien schon wieder auf gleicher Linie von 16° mit Südwestengland, im Oct. auf der Isoth. von 10° mit London und Dublin; im Nov. verbindet die Isoth. von 5° Wien mit den

Faröerinseln und im Dez. die von 0° mit Tornea. Wien hat schon nahezu Continentalklima, es nimmt an dem Klima von Orten Theil, die 30° aus einander liegen.

Die Begünstigung von Europa tritt noch mehr hervor in dem Verlaufe der Isanomalen (Dove). Berechnet man nämlich die mittlere Temp. der Parallelkreise, indem man die Summe der Mitteltemp. aller Grade durch 360 dividirt, und vergleicht diese berechnete oder normale mit der wirklichen Mitteltemp. der einzelnen Orte des Kreises, so findet man, daß nur wenige Orte diese normale Temp. haben; die Verbindungslinien dieser Orte nennt Dove die thermischen Normalen. Die anderen Orte haben entweder eine höhere oder niedrigere als die normale Mitteltemp., sie sind entweder zu warm oder zu kalt. Den Unterschied zwischen der wirklichen und der normalen Mitteltemp. nennt Dove die Anomalie, und die Verbindungslinien von Orten gleicher Anomalie Isanomalen; dieselben laufen den thermischen Normalen ungefähr parallel und sind um so weiter von denselben entfernt, je größer die Anomalie ist. Legt man die Gegenden der Isanomalen zu großer Kälte blau an und läßt die Gegenden zu großer Wärme weiß, wobei die Normalen die Grenzlinien bilden, so tritt deutlich die Begünstigung und Hintansetzung der Welttheile hervor. Zu warm erscheint ganz Europa, der nördliche atlantische Ocean und ein kleiner Theil von Nordwestamerika. Die Gunst ist am größten für Norwegen und das Meer von da bis Island, wo sie 8—11° beträgt, die Mißgunst am größten für die Gegend von Jakutzk und die Hudsonsbai; sie beträgt ebenfalls 8—11°. Faßt man diese Ergebnisse zusammen mit denen der Monatsisoth., so folgt, daß Europa zu milde Winter und zu warme Sommer hat, daß in Asien die Winter viel zu kalt und die Sommer heißer sind, als es der Breite zukommt, daß in Amerika die Hudsonsgegenden zu kalte Winter und zu kalte Sommer, der größere Theil die Verhältnisse Asiens und nur ein kleiner Theil im Nordosten zu milde Winter oder zu kühle Sommer hat, wie Island und Grönland; zugleich ist der Herbst in Amerika schöner als in Europa (Indianersommer), dagegen der Frühling in Europa schöner als in Amerika und nur von Frostrückfällen verdorben (die 3 Eismänner und die Junifröste).

Die Ursachen des Unterschiedes zwischen Land- und Seeklima liegen in der großen specif. Wärme des Wassers, in der Dampfwärme des Wassers und der Schmelzwärme des Eises. Wegen der großen specif. Wärme des Wassers wird das Meer im Sommer durch eine gleiche Wärme weniger erwärmt als die Continente; auch wird eine große Wärmemenge (600c für jedes kg) zu erhöhter Verdunstung, sowie ein Theil zur Schmelzung von Eisbergen (80c für 1 kg) verbraucht; also ist der Sommer der Weltmeere kühler als der der Länder; für Nordostasien wird die Sommerhitze außer der weiten Entfernung des Meeres noch durch die große Länge des Tages verstärkt. Im Winter kühlen sich umgekehrt die Meere bei gleicher Ausstrahlung weniger ab als das Land, bleiben daher länger warm, und die durch Abkühlung erfolgte Condensation und Eisbildung erzeugen Wärme und lassen die Abkühlung nicht so rasch geschehen, wie auf dem Lande; für die große Kälte von Innerasien wirken noch die langen Nächte mit. Die Wärme der großen Weltmeere im Herbste umfaßt Nordamerika zu dieser Zeit von 2 nicht weit von einander entfernten Seiten, daher der schöne Herbst Amerikas, während unser November und Dezember unter der rasch erfolgten Winterbildung Asiens leiden. Amerikas Frühling folgt einem sehr kalten Winter und ist von zwei tief erkalteten Weltmeeren umfaßt, ist daher der poetischen Blüthe unseres Lenzes beraubt, der auf einen milderen Winter folgt und durch den herrschenden Südwest weich und warm wird, aber durch einbrechenden Nordost und Nordwest Rückfälle erfährt; die Nordostrückfälle finden Ende April und Anfangs Mai statt, weil zu dieser Zeit das Eis Rußlands und Sibiriens schmilzt, dort die Luft abkühlt und zusammenzieht, wonach diese durch ihren größeren Druck nach Europa strömt. Die Nordwestrückfälle geschehen besonders im Juni, wenn Südasien sehr heiße aufgelockerte Luft enthält und des Nordmeeres Winterkühle noch durch Eisberge vermehrt wird, die in großer Zahl von den Grönlandgletschern losbrechen und im Nordmeere durch ihr Schmelzen die Luft schwer machen, so daß sie über Europa nach Südasien strömt; es entstehen die für Deutschland und besonders für die Rebenblüthe des Rheines so nachtheiligen Nordwestwinde, ja sogar Junifröste (Grönlandfröste, die Vorboten der dritten Eiszeit).

Die Ursache der überwiegenden Wärme der Westküstenländer und der Begünstigung Europas sind die Luftströme oder Winde und die Meeresströme. Die Westküstenländer werden im ganzen Jahre von Südwestwinden getroffen, welche an diese Küsten über warme Meere herkommen und daher warm und feucht sind; der Wasserdampf derselben wird condensirt und hierdurch eine große Wärmemenge erzeugt, die an den Ostküsten ganz fehlt, weil an diese die Südwinde über hohe Gebirge und Land her wehen und daher trocken sind. Ostküstenländer sind demnach auch trockener als Westküsten, das uns benachbarte Amerika ist trockener als Europa. Der zweite Hauptwind, der Nordostwind ist trocken, er ist im Sommer in Europa heiß, weil er über das heiße Asien weht, für Amerika aber kalt, weil er vom kalten Nordmeere kommt, selbst für Nordwestamerika kalt, da er über die

kalten Hudsonsländer weht. Dies ist die erste Ursache der Bevorzugung Europas; die zweite und gewichtigere ist der Golfstrom, der die Küsten Europas das ganze Jahr in warme Meeresarme einschließt, während Ostamerika von dem kalten arctischen Strome getroffen wird. Es sind demnach die klimatischen Unterschiede aufgehellt, wenn die Meeresströme und die zwei Hauptwinde erklärt sind. In der Physik der Erde sind die Meeresströme schon betrachtet worden; wir haben demnach hier die Winde noch nachzutragen.

Die Winde. Die Entstehung der Winde beruht auf dem Luftströmungsgesetze (399.): Wenn warme und kalte Lufträume mit einander in Verbindung stehen, so strömt die warme Luft oben in den kalten Raum und die kalte Luft unten in den warmen Raum. 600

So strömt bei jeder Feuersbrunst nach der Brandstelle ein Feuerwind; so strömt bei Nacht die Luft von dem rasch abgekühlten Lande nach dem wärmeren Meere, und bei Tage von dem kühleren Meere zu dem rascher erwärmten Lande (See- und Landwind, Brisen); so strömt in unserem Sommer die Luft von dem kühlen indischen Oceane nach dem heißen Asien und in unserem Winter von dem kühlen Asien nach dem wärmeren indischen Meere (Südwest- und Nordostmonsun).

Den großartigsten Temperaturunterschied aber bilden die äquatorialen gegen die mehr polaren Gegenden; es strömt daher unten die kühlere Luft nach dem Aeq. zu und oben die äquatoriale heißere Luft nach den Polen zu; den in der Richtung von den Polen nach dem Aeq. gerichteten unteren Luftstrom nennt man Polarstrom, die oben von dem Aeq. wegströmende Luft bildet den Aequatorialstrom. Auf unserer Halbkugel ist der Polarstrom ein Nordwind, der Aequatorialstrom ein Südwind; da nun durch die Drehung der Erde jeder Polarstrom östlich, jeder Aequatorialstrom westlich wird, so herrscht auf unserer Halbkugel der Nordostwind und der Südwestwind. In der heißen und warmen Zone wehen diese Winde über einander, der Nordost unten, der Südwest oben; durch seine Abkühlung in der Höhe wird der Südwest schwerer und kommt deßhalb in der gemäßigten Zone herab; in der gemäßigten Zone wehen also Nordost und Südwest abwechselnd und neben einander. Hierin liegt die Ursache der Veränderlichkeit unseres Wetters, sowie die Beständigkeit des Wetters der heißen Zone in dem Vorherrschen des Nordostes beruht. Nordost und Südwest wechseln in der gemäßigten Zone mit einander ab nach Doves Winddrehungsgesetz: der Südwest geht über West, Nordwest und Nord in den Nordost, der Nordost über Ost, Südost und Süd in den Südwestwind über.

Man erklärt die beiden Hauptwinde, die sogenannten Passatwinde, auch ohne das Luftströmungsgesetz zu Hilfe zu nehmen, in folgender Weise: durch die senkrecht auftreffenden Sonnenstrahlen wird die Luft am Aeq. stark erhitzt, ausgedehnt und aufgelockert, dadurch sehr leicht, und steigt deßhalb in die Höhe; nach dem verdünnten Raume strömt die Luft von beiden Halbkugeln, es entstehen die Polarströme, während die aufgestiegene Luft oben nach den Polen zu abströmt und in der gemäßigten Zone herabsinkt. Jeder Aequatorialstrom gelangt bei seinem Wehen aus Gegenden größerer Drehungsgeschwindigkeit an langsamer sich drehende Erdpunkte; diese Luft kann aber nach dem Gesetze der Trägheit ihre schnellere Bewegung nach Osten nicht aufgeben, bewegt sich also schneller von Westen nach Osten als diese Erdpunkte, hat also für diese eine Bewegung aus Westen; so wird der Aequatorialstrom auf unserer Halbkugel ein Südwestwind. Umgekehrt gelangt jeder Polarstrom durch sein Wehen in Gegenden größerer Geschwindigkeit, ohne diese sogleich annehmen zu können; es werden demnach diese Gegenden mit einer gewissen Geschwindigkeit durch jene Luft nach Osten hingeführt, so daß ihnen die Luft von Osten entgegenzukommen scheint; also wird jeder Polarstrom allmälig östlich, unser Polarstrom wird ein Nordost. Daß diese 2 Winde in der warmen Zone immer vorhanden sind, ist zweifellos; von Nordafrika weht ein stetiger Nordost nach Mittelamerika, der Columbus dorthin führte und überhaupt zum Passiren nach Amerika benutzt wurde, woher sich der Name Passatwinde erklärt. Das Vorhandensein des Aequatorialstromes in der Höhe wird durch den Zug der hohen Cirruswolken, durch die Richtung der Rauchsäulen hoher Vulcane und durch Aschenregen bewiesen; so fiel am 1. Mai 1812 auf Barbados ein Aschenregen von dem 20 M. westlich liegenden Vulcan von St. Vincent nieder, obwohl unten der Nordostpassat ununterbrochen von Barbados nach St. Vincent wehte. In etwas nördlicher liegenden Gegenden kann man den Südwest sogar direct wahrnehmen, z. B. auf dem Pic von Teneriffa, während unten in Santa-Cruz der Nordost weht. In der Gegend des Aeq., wo die Parallelkreise nur wenig an Größe zunehmen, ist auch die Passatbewegung fast nur nach dem

Aeq. gerichtet, hat also zu beiden Seiten des Aeq. die entgegengesetzte Richtung, wodurch diese Bewegung aufgehoben wird und sich in dem dort allgemeinen aufsteigenden Luftstrome oder Ascensionsstrome verliert; diese Stelle ist die Region der Calmen, welche in einer Breite von einigen Graden die beiden Seiten des Aeq. einnimmt. Auf diese Region folgt nach Norden und Süden zu bis zu 30° die Passatregion, wo nur der Polarstrom herrscht, welche sich indessen wie die Region der Calmen im Laufe eines Jahres etwas verschiebt; dann folgt die subtropische Zone, welche im Sommer dem Nordost, im Winter dem Südwest anheim fällt, weil im Winter der Südwest eher abgekühlt ist und daher südlicher herabkommt; endlich folgt die Region der veränderlichen Winde, wo der Südwestpassat herabgekommen ist und an einer Stelle mit dem Nordost nach Doves Winddrehungsgesetz abwechselt. Dasselbe wird folgendermaßen erklärt. Je länger der Südwestwind weht, desto mehr wird er westlich, weil er alsdann aus immer südlicheren Gegenden kommt, welche einen um so stärkeren Unterschied der Geschwindigkeit besitzen, durch welchen ja die westliche Richtung bedingt ist; endlich kann durch einen localen Einfluß der Wind ganz westlich werden. Dann setzt er sich dem weiteren Vordringen des Südwestpassates wie ein Damm entgegen, dieser muß daher seine Stelle verlassen und an eine zweite Stelle überspringen, wodurch an der ersteren der Nordpassat das Uebergewicht gewinnt, sich mit dem West erst zu Nordwest verbindet und bei dem Aufhören des localen Einflusses zu reinem Nord wird, der durch die Drehung der Erde in Nordost übergeht. Je länger dieser nun weht, desto mehr wird er östlich, weil er dann aus immer nördlicher gelegenen Gegenden kommt, welche einen immer größeren Unterschied der Geschwindigkeit darbieten; endlich kann er durch einen localen Einfluß ganz östlich werden. Dann setzt sich dieser Ost dem weiteren Vordringen des Nordoststromes wie ein Damm entgegen, der Nordost muß an dieser Stelle abspringen, an eine andere Stelle, vielleicht an jene erste, welche der Südwest vorher verlassen hat, während dieser jetzt an diese Stelle gelangen mag, wo er sich mit dem Ost zu Südost verbindet, um wenn der locale Ost zu Ende ist, durch Süd in den Südwest überzugehen.

Die jetzige Meteorologie, in deren Sinne auch die Publication der deutschen Seewarte geschehen, erklärt die Winde durch die Verschiedenheit des Luftdrucks: der Wind weht von den Gegenden höheren Luftdrucks nach Gegenden niederen Luftdrucks; rings um ein barometrisches Maximum bläst der Wind auf allen Seiten nach außen, rings um ein barometrisches Minimum auf allen Seiten nach innen. Jedoch weht er nicht senkrecht zur Isobare in der Richtung des Gradienten, sondern ist auf der nördlichen Halbkugel nach rechts und auf der südlichen nach links abgelenkt. Die Ablenkung von dem Gradienten ist um so stärker, je größer die Geschwindigkeit des Windes ist, und diese ist um so größer, je größer der Gradient ist, je näher also die Isobaren beisammen liegen. Gradienten unter $0{,}3^{mm}$ sind Windgradienten, Gradienten über $0{,}3^{mm}$ sind Sturmgradienten, sie gehen in den Cyclonen bis zu 4^{mm}.

Die ältere Erklärung ist im Grunde nicht von der neuen verschieden, da das Luftströmungsgesetz auf der Verschiedenheit des Luftdrucks beruht; indessen ist die neuere allgemeiner, da eine Erhöhung oder Erniedrigung auch ohne Wärmewirkung eintreten könnte; indessen ist die neue Erklärung noch nicht umfassend, da die Entstehung der barometrischen Verschiedenheiten, der Maxima und Minima, und die Wanderungen derselben noch nicht völlig erklärt sind. Am Aeq. herrscht durchgängig ein Luftdruck von 760^{mm}, in den tropischen Gegenden von 764^{mm}, wodurch sich die Passate ergeben. In der Wärmecalme des Aeq. findet in Folge derselben die Ascension und das Abströmen in der Höhe statt; an der nördlichen Grenze der trop. Zone sinkt der obere Strom theilweise herab, erzeugt hier die Calmen der Roßgegenden. Aehnliche Calmen durch absteigende Luft entstehen in den Wintern der großen Continente durch Ausstrahlung der Wärme nach dem klaren Himmel; so entstehen die Kältecalmen von Sibirien, Neuholland, Nord- und Südamerika mit einem barometrischen Max., von dem die Luft nach allen Richtungen abfließt und unseren winterlichen Nordost, den Nordostmonsun, die Nordwestwinde Chinas u. s. w. erzeugt; die Wintercalme Neuhollands treibt durch ihren Luftdruck von April bis Sept. Winde nach allen Richtungen bis ins Meer hinaus. In den Sommern entstehen dagegen barometrische Minima durch die kräftige Sonnenwärme der langen Sommertage, so daß die Winde nach diesen Centren hinströmen und daher meist die entgegengesetzte Richtung haben, so in China die südöstlichen Winde, in Neuholland nach innen fließende Luftströme. Verfolgt man die isobarischen Karten Tag für Tag oder die meteorologischen Publicationen, so findet man, daß die Winde nach den Punkten der Minima hin und von denen der Maxima wegwehen und sich mit den Wanderungen dieser Punkte ändern, natürlich mit den Aenderungen, welche die Ablenkung der Erddrehung veranlaßt.

Die Ablenkung der Winde nach rechts von der Richtung des Gradienten ist so zu verstehen: man denkt sich so gestellt, daß man dem Maximum den Rücken zuwendet, also in der Richtung des Gradienten nach den Gegenden niederen Luftdruckes sieht, so wird der Wind auf der nördlichen Halbk. immer nach rechts abgelenkt; daß dies mit der Verwandlung des Süd in Südwest und des Nord in Nordost durch die Erddrehung stimmt und sich daher aus dieser erklärt, ist leicht ersichtlich; je kleiner die Gradienten sind, desto kleiner ist die Geschw. des Windes, desto geringer ist also die Ablenkung, desto mehr weht der Wind in der Gradientenrichtung; je größer die Gradienten sind, desto größer ist die Geschw., desto stärker ist die Ablenkung, desto mehr nähert sich der Wind den Isobaren. Hieraus ergibt sich die Regel zur Auffindung der Lage des Minimums: Wendet man dem Winde den Rücken zu, so hat man das Minimum des Luftdrucks vorn zur Linken, und um so mehr zur Linken, je heftiger der Wind weht (Buys-Ballots Windregel).

Die Hauptwinde erfahren durch locale Einflüsse, insbesondere durch Gebirge oft bedeutende Aenderungen und wandeln sich in Specialwinde einzelner Gegenden um. 1. Der Föhn in der Schweiz ist ein abgelenkter Südwestpassat. Durch das Aufsteigen in den immer enger werdenden südlichen Alpenthälern erhält derselbe eine sturmartige Geschw., erfährt starke Condensation und bringt daher starke Regen an den Südabhängen und Schnee auf den Höhen hervor, wodurch er schon trockener und nicht mehr kühler wird. Auf den Gipfeln angelangt, stürzt er in derselben oder wenig geänderten Richtung in die hohe Luft der Schweiz, reißt die tiefere Luft fort, erzeugt so niedrige Barometerstände und stürzt deßhalb plötzlich in etwas nördlichere Thalgegenden mit zerstörender Gewalt herab; hierdurch verdichtet wird er wärmer und abermals trockener. Kommt er aus Westen oder Nordwesten, so ist er für die Schweiz ein feuchter Föhn. 2. Der Scirocco in Italien hat dieselbe Entstehung. 3. Die Bora in den osteuropäischen Meeren ist ein durch Gebirge veränderter Nordostpassat; da dieser beim Aufsteigen in den Thälern keine Condensation erfährt, so wird er abgekühlt; wegen seiner Schwere muß er auf der anderen Gebirgsseite in den engen Thälern verdichtet herabströmen; stürzt er nun in die offenen Meere, so dehnt er sich stark aus, kühlt sich abermals ab und verwandelt die aufgewühlten Meereswogen in Eis. 4. Der Harmattam an der Guineaküste entsteht ähnlich. 5. Der Mistral in Südfrankreich. 6. Der Samum in Arabien, Persien ist ein heißer, staubreicher, versengender Wüstenwind. 7. Der Chamsin weht 50 Tage lang zur Zeit der Frühlingsnachtgleiche in Aegypten aus der Sahara her, während im Sommer die Saharaluft nach dem Aeq., im Winter nach dem Mittelmeere weht.

Die Stürme (Dove 1827, Reye 1872). Ein Sturm ist ein Wind, der über eine gewisse Geschw., auf dem Lande über 15^m, auf dem Meere über 24^m, hinausgeht und Geschwindigkeiten bis zu 50^m erreicht. Diese große Geschw. entsteht durch große Verschiedenheiten des Luftdrucks, durch Gradienten von 0,3 bis 4^{mm}. Nach Mohn (1875) sind alle Stürme entweder ganze Wirbel oder Wirbeltheile, und zwar sind die Stürme der tropischen Meere, die Hurricanes in den westindischen und die Teifune in den chinesischen Meeren wahre Cyclonen oder Wirbelstürme, in welchen die Luftmassen geschlossene Bahnen um einen windstillen Mittelraum, das Auge des Sturmes, beschreiben, während der ganze Wirbel noch eine fortschreitende Bewegung von 6 bis 12^m Geschw. besitzt. Diese Cyclonen haben äußere Durchmesser von 12 bis 80 M., während der innere Durchmesser, die Weite des windstillen Auges, zwischen 2 und 4 M. liegt. In dem Auge herrscht der tiefste Barometerstand, bis zu 70^{cm} herab; nach außen zu steigt der Luftdruck zuerst sehr stark, dann allmälig immer weniger, bis er den gewöhnlichen Stand erreicht, so daß die Isobaren, welche concentrische Curven um das Auge herum bilden, innen ganz nahe beisammen liegen und nach außen weiter aus einander gehen; bei den stärksten Stürmen fällt die Windrichtung fast in die Isobaren und ist wie diese oft kreisförmig. Auf der nördlichen Halbkugel geschieht die Wirbelbewegung in der Richtung entgegengesetzt der Uhrzeigerbewegung von Osten über Norden nach Westen, oder, wie man sich ausdrückt, gegen die Sonne, auf der südlichen Halbkugel umgekehrt. Auch die Richtung der Fortpflanzung ist eine bestimmte; hieraus folgt die Möglichkeit, das Eintreffen von Stürmen vorherzusagen, sowie praktische Regeln zur Vermeidung und Benutzung der Stürme. Da auch die Stürme der außertropischen Zonen ganze Wirbel oder Wirbeltheile sind, so gelten die Regeln auch für diese Stürme. Zeigen die synoptischen Karten der Barometerstände die concentrischen Krümmungen mit starker Annäherung der Isobaren und

601

kennt man die Fortpflanzungsrichtung des barometrischen Minimums, so kann man das Herannahen eines Sturmes voraussagen (Sturmwarnungen); das Näherkommen wird durch kreuzenden Seegang, Fallen des Barometers und eine auf weite Entfernungen sichtbare dunkle Wolkenbank angedeutet. Die Lage des Minimums ergibt sich nach Buys-Ballots Regel: Stellt man sich mit dem Rücken gegen den Sturm, so liegt das Centrum auf der Linken. Dies Centrum und das sogenannte gefährliche Viertel, wo die Dreh- und die Windrichtung übereinstimmen, hat der Schiffer besonders zu vermeiden, andere Stellen, die für seinen Curs passen, sucht er auf, um eine schnelle Fahrt zu machen.

Die fürchterlichen Cyclonen der Tropen sind glücklicherweise verhältnißmäßig selten; während nach Maury im atlantischen Ocean zwischen 5 und 10° (am Aeq. sind die Stürme äußerst selten) jährlich 2 Sturmtage beobachtet werden, kommen zwischen 55 und 60° deren 151 vor. Die Entstehung dieser schwächeren Stürme der gemäßigten Zone, sowie die Gesetze ihrer Fortschreitung kennt man noch nicht allseitig; sie entstehen jedenfalls auch durch ein barometrisches Minimum, von welchem aus nach allen oder nach einigen Seiten der Luftdruck stark zunimmt. Die tropischen Cyclonen entstehen nach Reye durch ein labiles Gleichgewicht der Luftschichten, in welchem die tiefsten Luftschichten durch sehr starke Erhitzung über ruhigem Meere leichter sind als höhere und reichlich Wasserdampf enthalten. Wird ein solches labiles Gleichgewicht z. B. durch ein stärkeres Wehen des Nordostpassates gestört, so steigen die Luftmassen mit beschleunigter Geschw. auf; durch die hiermit verbundene Ausdehnungskälte entsteht starke Condensation, welche schon an sich die Luftspannung erniedrigt, aber insbesondere durch starke Wärmeerzeugung die Luft immer noch weiter ausdehnt und so die Ascension befördert. Durch diese dauernde Ascension entsteht der niedrige Luftdruck des Sturmauges und ein Herbeiströmen der Luft von allen Seiten nach dem Minimum; jeder Luftstrom aber wird nach rechts abgelenkt, ein nördlicher nach Westen, ein westlicher nach Süden, ein südlicher nach Osten u. s. w., und zwar fortwährend; daher nimmt jeder Luftstrom Spiralform an, weicht aber um so stärker von der radialen Richtung ab, je größer seine Geschw. ist, so daß bei starken Sturmgradienten die Bewegung fast kreisförmig wird; jedoch ist sie immer noch etwas spiralig, bringt daher immer neue Luft ins Auge, die sich dort verdünnt, aufsteigt und so die Condensation für längere Zeit erhält, die dunkle Sturmwolke, Gewitter und gewaltige Regen bewirkt. Wegen der Ablenkung nach rechts geht auf der nördlichen Halbkugel die Bewegung im Wirbel z. B. über Nord nach West und Süd, dem Dove'schen Winddrehungsgesetz und der Sonne entgegen, auf der südlichen Halbkugel wegen der Ablenkung nach links umgekehrt. An der Grenze des Sturmauges herrschen die stärksten barometrischen Differenzen, daher ist hier die Geschw. am größten; deßhalb und wegen der stärksten Richtungsänderung der Luftbewegung an dieser Stelle ist hier die größte Gefahr. An der südöstlichen Seite des Wirbels ist die Wirbelrichtung südwestlich also entgegengesetzt dem herrschenden Nordostpassat; diese beiden Winde stauen sich hier, bewirken einen starken Luftdruck und treiben den ganzen Wirbel nach Nordwesten, z. B. von Westindien nach Nordamerika; tritt er aus der Passatregion in ruhige Luft, so geht er nach Nordosten, weil die leichteste, südliche Luft durch die Drehung an die Nordostecke des Wirbels kommt; so gelangt der Wirbel nach England, Skandinavien. Kommt er in das Bereich des Südwest, so schreitet er nach Südost weiter, nach Rußland. Während dessen wird er durch die Centrifugalkraft, die anfänglich ebenfalls den Wirbel erhält, immer weiter, das Auge kühlt sich mehr und mehr ab, empfängt immer mehr Luft, wodurch die Bewegung sich allmälig verliert. Die colossalen, nach Millionen von Pferdekräften sich bemessenden mechanischen Effecte erklären sich aus der äquivalenten Wärmemenge, die durch Condensation des Wassers frei wird. In ähnlicher Weise bilden sich die Tornados in Nordamerika, denen wegen ihres geringeren Durchmessers die Wirbelbewegung fehlt, und die Windhosen, Wasserhosen, Wettersäulen oder Tromben.

602 **Die Feuchtigkeit der Luft.** Die Luft ist feucht, d. h. sie enthält Wasserdampf, der als farbloses, durchsichtiges Gas unsichtbar ist. Man unterscheidet absolute und relative Feuchtigkeit; die absolute Feuchtigkeit ist der Gehalt eines bestimmten Luftraumes an Wasserdampf. Man kann das Gewicht desselben direct bestimmen, indem man das Luftvolumen mittels eines Aspirators durch eine Chlorcalciumröhre leitet und die Gewichtzunahme derselben mißt, oder auch indirect, indem man die Spannung des Wasserdampfes aufsucht und aus dieser das Gewicht berechnet. Dalton hat nämlich gefunden, und Regnault hat es für die in der Atmosphäre möglichen Fälle bestätigt, daß die Spannung und Dichte des Wasserdampfes im lufterfüllten Raume

ebenso groß sind als im luftleeren Raume, daß also die Dichte des Wasserdampfes = 0,625 von derjenigen der Luft von gleicher Spannung sei; kennt man demnach die Dampfspannung, so kann man hieraus das Gewicht des Dampfes berechnen. Auch folgt aus Daltons Gesetz, daß jedes Luftvolumen bei einer bestimmten Temperatur nicht mehr als eine bestimmte Dampfmenge von bestimmter Spannung aufnehmen kann, deren Größe aus Tabelle 414. zu ersehen ist, und daß ein solcherweise dampfgesättigter Luftraum bei Erniedrigung seiner Temperatur eine Condensation des Wasserdampfes erfährt, durch welche derselbe sich in Bläschenform als Nebel oder Wolke niederschlägt.

Wichtiger ist die relative Feuchtigkeit, d. i. das Verhältniß der in einem Luftvolumen vorhandenen Dampfmenge zu der bei derselben Temperatur möglichen d. i. gesättigten Dampfmenge, weil die Größe derselben erkennen läßt, ob eine Condensation bevorstehen kann oder nicht. Ist die relative Feuchtigkeit = 1 oder nahezu = 1, so wird eine geringe Abkühlung schon Condensation bewirken; man nennt dann die Luft sehr feucht. Ist die relative Feuchtigkeit ein kleiner Bruch, so kann die Luft noch viel Wasserdampf bis zur Sättigung aufnehmen; eine geringe Abkühlung bewirkt noch keine Condensation; man nennt die Luft trocken. Weil indessen kühlere Luft schon mit einer geringeren Dampfmenge gesättigt ist, so kann dieselbe Dampfmenge heiße Luft trocken, kühle Luft aber feucht machen; außerdem kann jede Luft soweit abgekühlt werden, daß sie mit der in ihr vorhandenen Dampfmenge gesättigt ist. Die Temperatur, bei welcher Luft mit der in ihr vorhandenen Dampfmenge gesättigt ist, nennt man den Thaupunkt. Ist die Luft gesättigt, so ist die wirkliche Temperatur der Thaupunkt; ist die Luft trocken, so liegt der Thaupunkt weit von der wirklichen Temperatur entfernt; daher bietet der Thaupunkt ein Mittel, die relative Feuchtigkeit zu bestimmen mittels Daniells Hygrometer; doch muß mit diesem Apparat für jede Bestimmung ein Versuch gemacht werden, während an Augusts Psychrometer die Daten zur Bestimmung jeden Augenblick abgelesen werden können.

Daniells Hygrometer besteht aus 2 Glaskugeln, welche durch ein 2 mal rechtwinkelig umgebogenes Glasrohr mit einander verbunden sind; die eine Kugel ist theilweise mit Aether gefüllt, mit einer vergoldeten Zone umzogen und enthält die Kugel des den Thaupunkt angebenden in die eine Röhre befestigten Thermometers, während die andere Kugel mit Musselin umwunden ist, und das Gestell ein zweites Thermometer zum Ablesen der Luftwärme trägt. Auf den Musselin wird nun Aether geträufelt, durch dessen rasche Verdunstung die in der Kugel befindlichen Aetherdämpfe condensirt und dadurch der Aether in der anderen Kugel zur raschen Verdampfung veranlaßt wird; durch diese wird die andere Kugel abgekühlt. Ist sie bis zum Thaupunkte abgekühlt, so schlagen sich auf der Kugel Dämpfe nieder, was an der Trübung der Goldzone erkannt wird, wobei das innere Thermometer diese Temperatur, den Thaupunkt, angibt. Mit diesem und der an dem äußeren Thermometer abzulesenden Lufttemperatur geht man an die Tabelle 414; neben dem Thaupunkte steht die Spannung, die der vorhandene Dampf wirklich hat, neben der Lufttemperatur die Spannung, die er bei dieser Temp. haben könnte; das Verhältniß beider gibt die relative Feuchtigkeit.

Das Psychrometer von August besteht aus 2 gleichen, auf einem Gestelle befestigten Thermometern, von denen das eine durch ein seine Kugel umwindendes Gewebe feucht erhalten wird. Je trockener nun die Luft ist, desto mehr von dieser Feuchtigkeit wird verdunsten und dadurch das Thermometer erniedrigen, während das andere die Temp. der Luft angibt. Aus der thermometrischen Differenz läßt sich die Spannung des vorhandenen Dampfes berechnen, wofür Formeln und Tabellen aufgestellt sind. Für ein ungefähres Urtheil über den Feuchtigkeitszustand der Luft reicht schon ein Blick auf die Thermometer hin; je größer ihr Unterschied besonders im Verhältnisse zu der Temperatur der Luft ist, desto trockener ist dieselbe. Genauere Berechnung ist durch folgende Betrachtung möglich. Nach Daltons Untersuchungen hängt die Menge des von einer Oberfläche verdunstenden Wassers ab von dem Luftdrucke oder Barometerstande, von der Temperatur der Flüssigkeit oder der Spannung des Dampfes derselben und der Spannung x des schon vorhandenen Dampfes, und zwar so, daß sie der Differenz dieser beiden Spannungen direct und dem Barometerstande b umgekehrt proportional ist; folglich ist die von dem feuchten Thermometer abdunstende Wassermenge $= c\,(s - x) : b$, wofür die Wärmemenge nöthig ist $cw\,(s - x) : b$, wenn w die Dampfwärme bezeichnet. Sind nun die Temp. des

trockenen und des feuchten Thermometers = t und t', so erhält das letztere von der Luft eine der Differenz t — t' proportionale Wärmemenge e (t — t'), wo e wieder eine neue Constante bedeutet; da diese Wärme zum Verdunsten verbraucht wird, so ist cw (s — x) : b = e (t — t'), woraus x = s — a (t — t') b, wenn die Constanten in a zusammengefaßt sind; diese Constante a ist nach Regnault = 0,000 635; folglich kann man aus den Thermometerständen t und t', der Spannung des dem feuchten Thermometer entsprechenden Dampfes und dem Barometerstande die Spannung x des Luftdampfes berechnen. — Außer diesen Hygrometern ist noch zu solchen Apparaten verwendet worden die Fähigkeit mancher organischen Substanzen, sich durch Aufsaugen von Feuchtigkeit zu verlängern und durch Trocknen zu verkürzen, oder ihre Windungen auf- und zusammenzurollen, wie es z. B. bei Menschenhaaren, Fischbeinstreifen, Darmsaiten, Geraniumgrannen u. A. der Fall ist. Im Saussures Haarhygrometer geht ein oben befestigtes Haar unten um eine leicht bewegliche Rolle und ist dann durch ein kleines Gewicht gespannt; bei seiner Verlängerung dreht es die Rolle und mit derselben einen auf einer Skala spielenden Zeiger; doch geben diese Apparate nur ein ungefähres Maß.

Durch Anwendung solcher Methoden hat man gefunden: Die absolute Feuchtigkeit wächst täglich und jährlich mit der Temperatur; nur hat sie im Sommer, weil der aufsteigende Luftstrom die Feuchtigkeit in die Höhe führt, Morgens und Abends 8 Uhr ein Maximum und Mittags und Morgens 3 Uhr ein Minimum. Sie ist bei Südwestwinden größer als bei den übrigen, so daß man eine atmische, wie eine thermische und eine barometrische Windrose unterscheidet. Die relative Feuchtigkeit hat umgekehrt wie die absolute ihr Minimum in der heißesten, ihr Maximum in der kühlsten Tageszeit, schließt sich aber im Jahre wie die absolute der Temperatur an. Sie ist auch in verschiedenen Gegenden verschieden, z. B. in Nordamerika, wo die Südweste über Land wehen, viel kleiner als bei uns; daher ist dort die Verdunstung viel rascher als in Europa, Wäsche trocknet schnell, Brod wird rasch steinhart, Gebäude können gleich bezogen werden, die europäischen Klaviere verderben dort, während die amerikanischen sich bei uns vorzüglich halten, der Mensch verdunstet rascher seine Flüssigkeit, wodurch der Stoffwechsel, die Assimilation, die ganze Menschennatur lebhafter wird. Die Verdunstung geschieht nämlich um so rascher, je trockener die Luft ist, folglich auch je öfter dieselbe durch Wind erneuert wird, so daß bewegte Luft die Verdunstung befördert; außerdem geschieht dieselbe um so rascher, je höher die Temperatur und je geringer der Luftdruck ist; dies widerspricht nicht dem Satze, daß die gesättigte Dampfmenge eines Raumes unabhängig von dessen Lufterfüllung sei; ein gewisser Raum nimmt dieselbe Dampfmenge auf, ob er luftleer, verdünnt oder mit dichter Luft gefüllt ist; nur geschieht die Dampferfüllung um so rascher, je kleiner der Luftdruck ist.

603 **Atmosphärische Niederschläge.** 1. Nebel und Wolken. Nebel sind tief herabgehende Wolken, Wolken sind hochschwebende Nebel. Nebel und Wolken sind also nicht verschieden, sie sind Ansammlungen von Wasserbläschen, welche durch Condensation des Wasserdampfes der Luft in unendlicher Zahl entstehen und vermöge ihrer Kleinheit und Leichtigkeit in der Luft schweben. Condensation aber findet statt, wenn ganz oder nahezu dampfgesättigte Luft abgekühlt wird, oder wenn zwei ganz oder nahe dampfgesättigte Luftmassen sich mit einander mischen. Abkühlung aber erfährt Luft, wenn sie als Ascensionsstrom in die Höhe steigt, weil sie hierbei sich ausdehnt und weil die Ausdehnung mit Wärmeverbrauch verbunden ist, doch wirkt hierbei auch die Kälte der hohen Regionen mit. Auch erfährt die Luft Abkühlung, wenn sie als Aequatorialstrom in höhere Breiten gelangt, über kalte Bergesgipfel strömt, oder die kühle Erde, das kalte Wasser berührt. Eine Mischung von Luft entsteht, wenn ein Luftstrom in ruhige Luft eindringt, oder wenn zwei Luftströme einander zu verdrängen suchen, wie beim Kampfe der beiden Passatströme auf der West- oder Ostseite der Windrose; bei einer solchen Mischung muß Condensation stattfinden, weil die der Mitteltemperatur entsprechende Dampfspannung geringer als die Mittelspannung des in beiden Luftmassen enthaltenen Dampfes ist.

Warum, wie und ob immer die Condensation in Form von Bläschen stattfindet, ist noch nicht festgestellt; die Größe der Bläschen berechnete Kämtz aus dem Durchmesser der kleinen Sonnen- und Mondhöfe und fand den Durchmesser derselben gleich 0,02^{mm}, während Kratzenstein für die Hautdicke nur 0,0001^{mm} angibt. Wenn diese Bläschen schwerer als Luft sind, so müssen sie sinken; wirklich kann man in einer auf einem Berge schwebenden Nebelwolke ein unaufhörliches Gewoge wahrnehmen; ja nach Dove bildet sich eine Wolke immer von Neuem, indem ihre Nebelbläschen sinken und fortgeführt werden, sich in der trockneren und wärmeren Luft dann auflösen, während an der Wolkenstelle immer

neue Bläschen entstehen, wodurch sich das Bleiben der Wolke, aber auch ihre stete Veränderlichkeit erklärt; Dove vergleicht die Wolkenbildung mit dem Schaumwölkchen eines Baches über einer Stromschnelle, das sich immer neu bilde und doch beständig scheine. Indessen wird auch angeführt, daß die Bläschen wegen ihrer Kleinheit nur schwer den Widerstand der Luft überwinden können und daher sehr langsam fallen; bei den Ascensionswolken kann auch die aufströmende Luft mitwirken. Nach Meißner entstehen Bläschen nur in sauerstoffhaltiger Luft durch Mitwirkung des Ozons und des Antozons, während in anderen Gasen sich sofort kleine Tröpfchen bilden; auch sollen schon Regenbogen von Wolken beobachtet worden sein. In sehr bedeutender Kälte oder Höhe condensirt sich der Wasserdampf zu feinen, sechsseitigen Eisnadeln; doch soll es auch vorkommen, daß die Bläschen einer Wolke aus überkaltetem Wasser bestehen.

Man unterscheidet nach Howard 4 Wolkenformen: 1. Cirrus oder Federwolke, feine, weiße Streifen, Meilen hoch am blauen Himmel, aus Eisnadeln bestehend, erzeugt durch den hoch vordringenden Aequatorialstrom. 2. Cumulus oder Haufwolke, dicke, kugelige Wolkenballen mit kugeligen Einzelgliedern, erzeugt durch den Ascensionsstrom, oft wieder sich auflösend, am fernen Horizont gebirgartige Gruppen bildend. 3. Stratus oder Schichtwolke, fern schwebende Nebelbänke von langgestreckter Gestalt in wagrechter Richtung, an dem Orte ihres Entstehens den Himmel einhüllend, durch Luftmischung entstanden. 4. Nimbus oder Regenwolke, eine einförmig graue, oft zerrissene, den ganzen Himmel bedeckende Wolkenmasse, durch immer größere Anhäufung und Zusammenfließen der übrigen Formen entstanden. Als Zwischenformen werden angeführt: 5. Cirrocumulus, weiße, zarte runde Wölkchen, auch Schäfchen genannt, werden beim Herabkommen zu zusammenrinnenden Haufwolken. 6. Cirrostratus, lange, schmale, wagrechte Wolkenschichten, die über uns einen zerrissenen Himmel bilden, gehen häufig aus Cirrus hervor und in Stratus über, sind Zeichen des weit herabgekommenen Aequatorialstromes und fließen in Nimbus zusammen. 7. Cumulostratus ist eine stark vergrößerte, dunkle, den Himmel verfinsternde Hauf- und Gewitterwolke, beim Eindringen des Polarstromes entstehend. — Die Höhe der Wolken ist sehr verschieden; in den tropischen Gegenden schätzt Humboldt sie im Mittel auf 3000^m, bei uns gehen sie an Regentagen bis auf 600^m herab.

Die meiste Wolkenbildung geschieht durch den Ascensionsstrom, auf dessen Gipfel die Wolke als eine Schaumkrone erscheint; in den tropischen Gegenden mag die Wolkenbildung ausschließlich, bei uns im Sommer vorwiegend hierdurch geschehen. Der hoch oben hinziehende Aequatorialstrom bildet an seiner Berührung mit der anderen Luft weiße Wolkenstreifen, auf einer Bergesspitze einen Wolkenhut, mehr in der Tiefe lange Wolkenbänke oder Nebel; eine ganz ähnliche Bildung ist die Hauchwolke vor unserem Munde im Winter, die Dampfwolke über kochendem Wasser, die Nebel über Wasser und feuchten Gründen. Die Herbstnebel entstehen durch Eindringen des Polarstromes in warme Sommerluft, bringen daher meist schönes Wetter, die Winternebel durch Eindringen des Südwest in kalte Winterluft, zeigen daher schlechtes Wetter an. — Daß zwei Luftströme, beide zwar feucht, aber doch vollständig klar, durch ihre Mischung Condensation bewirken, beruht darin, daß die Dampfspannung stärker ab- und zunimmt als die Temperatur; es ist daher das arithmetische Mittel zweier Spannungen größer als die Spannung, welche dem Mittel der Temperaturen entspricht. Mischt man z. B. 2 gleiche Dampfvolume von 100 und 150^0, also von 760 und 3581^{mm} Spannung, so müßte bei Unveränderlichkeit durch Mischung eine Spannung von 2170^{mm} entstehen, während doch der Dampf, der der mittleren Temp. von 125^0 entspricht, nur 1744^{mm} Spannung haben kann (414.); es muß daher ein Theil des Dampfes zu Wasser werden. — Wenn der Nordost den Südwest zu verdrängen sucht, so bringt die kältere Luft in weit verbreitete feuchte Luft ein, bringt also hier auf der Westseite der Windrose eine starke Wolkenbildung hervor; weniger stark ist sie auf der Ostseite, weil beim Eindringen des Südwest die trockene Luft weit und breit vorhanden ist; sie beginnt in größerem Maße, wenn der Südwest gesiegt hat und überall die kühle Erde berührt. — Die trockenen Nebel sind entweder Höhenrauch, der Rauch entfernter Moorbrände, oder Wüstenstaub, vulkanische Asche, oder vielleicht Meteorstaub.

604 2. Der Regen und das Wetter. Regen entsteht, wenn die Condensation des Wasserdampfes so reichlich ist, daß die Bläschen zu Tropfen zusammenfließen, welche durch ihre Schwere herabfallen. Während des Fallens vergrößern sich meist die Tropfen durch fortgesetzte Condensation an ihrer Oberfläche, weßhalb die Regenmenge

mit der Tiefe des Falles wächst; doch kommt auch die umgekehrte Erscheinung vor, daß die Tröpfchen beim Fallen durch trockene Luft sich allmälig wieder auflösen, daß es also nur in der Höhe regnet. Man unterscheidet Landregen und Strichregen oder Schauer; der erstere dauert längere Zeit mit mäßiger Stärke und kleineren Tropfen und entsteht durch den heruntergekommenen und an der Erde abgekühlten Aequatorialstrom, wird daher von Dove Niederschlag des Stromes genannt; der letztere dauert kürzere Zeit mit großer Menge und dicken Tropfen, entsteht durch das Eindringen des Polarstromes und ist häufig im Sommer mit Gewittern, im Frühling mit Graupelschauern, im Winter bei Nordwest mit Schneegestöber verbunden, Niederschlag des Ueberganges. Die jährlich niederfallende Regenmenge, die man durch Ombrometer mißt, drückt man durch die Höhe in Centimetern aus, zu welcher sämmtliches niederfallende Wasser über die Erdoberfläche ansteigen würde, wenn kein Fortfließen, Einsickern und Verdunsten stattfände; die größte jährliche Regenmenge wurde beobachtet in Cherraponje am Südabhange der Cossya-Hills in Bengalen, beinahe 1500^{cm}, während sie bei uns nur 50^{cm} beträgt. Die Regenmenge hängt hauptsächlich von der herrschenden Windrichtung und der Gliederung des Bodens ab; wo ein feuchter Südwest durch eine westliche oder südliche Bergwand gestaut oder abgekühlt wird, entsteht am meisten Regen, während die andere Seite, die Leeseite des Gebirges und dessen Hinterland wenig Regen erhält; auch nimmt die Regenmenge mit der Entfernung von den Weltmeeren ab, sowie mit der fortschreitenden Entwaldung eines Landes.

Das Ombrometer ist in seiner einfachsten Einrichtung ein cylindrisches Blechgefäß mit einem gläsernen Wasserstandszeiger und einem genau gleich weiten Auffangegefäße, das oben auf das Blechgefäß gesetzt wird und mit seinem trichterförmigen Boden den Regen in dieses einleitet, aber die Verdunstung hindert. Den Einfluß der Windrichtung und der Gebirgzüge erkennt man besonders daraus, daß Coimbra in Portugal vor der Sierra d'Estrella 300^{cm}, das Tajogebiet dagegen nur 40^{cm} Regen erhält, daß weiter Bergen in Norwegen 220^{cm}, Stockholm aber nur 50^{cm} Regen hat, daß am Südabhange der Alpen Regenhöhen von 150—200^{cm} vorkommen, während in Wien die jährliche Regenmenge noch nicht 40^{cm} erreicht. Die über den großen Ocean wehenden Südweste condensiren ihren Wasserdampf am Westabhange der langen Andenkette, sind daher für ganz Ostamerika trocken; dasselbe Verhältniß findet für Bengalen und Hochasien statt. Die Küsten, selbst die Ostküsten der Weltmeere sind reich an Regen; in Großbritanien regnet es jährlich 100, in Holland 70, in Deutschland 50, in Rußland 40, in Sibirien 30^{cm}. Die Wälder der Berge verhindern den raschen Abfluß des Regenwassers ins Meer und dadurch die großen Ueberschwemmungen; sie saugen die Regenmenge auf und bilden einen porösen wasserhaltigen Waldboden; sie bieten der Verdunstung eine große Oberfläche, befördern daher dieselbe und erzeugen Regen. Die Entwaldung macht unfruchtbar und schränkt die Regen auf gewisse Perioden ein. Kleinasien, Griechenland, Nordafrika, Sicilien, Italien und Südfrankreich haben nicht mehr die alte Fruchtbarkeit wegen der Entwaldung; dagegen hat Unterägypten seit seiner Bewaldung durch Ibrahim Pascha mehr Regen als früher.

Auf die Regenmenge, die Zahl der jährlichen Regentage und die Vertheilung des Regens auf die Jahreszeiten hat den größten Einfluß die geographische Breite und zwar hauptsächlich durch die von ihr abhängige Windrichtung, so daß auch in dieser Beziehung das Wetter, dessen Hauptfactoren ja Wind und Regen sind, sich mit der Breite ändert. In der Region der Calmen, einige Breitegrade am Aequator umfassend, wo ausschließlich der Ascensionsstrom herrscht, ist Abends, Nachts und Morgens der Himmel heiter, während es den Tag über mit Gewitter regnet, am heftigsten und längsten zur Zeit der Aequinoctien, am wenigsten zur Zeit der Solstitien. In der intertropischen Region außerhalb der Calmen herrscht im Sommer der Ascensionsstrom und der Passat und erzeugt Regenzeit, im Winter nur der Passat, wodurch Trockenzeit entsteht. Die Regenzeit ist am stärksten zur Zeit des Zenithstandes der Sonne, hat also 2 Maxima, welche nahe am Aequator fast ein halbes Jahr aus einander liegen, nach den Wendekreisen zu aber immer näher zusammenfallen. In den tropischen Gegenden selbst, den Gegenden der Wendekreise, etwa bis 30° herrscht der Ascensionsstrom nur zur Zeit des zenithständigen Solstitiums und erzeugt eine kurze Regenzeit, sonst herrscht der Polarstrom allein und bringt eine mehr als halbjährige Trockenzeit hervor. Dann folgt die regenlose Zone etwa bis 35°, wo ausschließlich der Passat herrscht und dadurch völlige Trockenheit entsteht. In der subtropischen Region, die sich etwa bis zum 40. Grad erstreckt, weht im Sommer

der Polarstrom und erzeugt eine Trockenzeit, im Winter aber kommt der Aequatorialstrom schon in diesen niederen Breiten herab, wodurch eine winterliche Regenzeit entsteht. In etwas höheren Breiten bis etwa 45° liegt die Zone des Frühlings- und Herbstmaximums des Regens, weil hier der Aequatorialstrom im Frühling und Herbst die Erde berührt und reichliche Niederschläge hervorbringt; er stürzt hierbei wohl einmal über die Alpen hinaus und erzeugt die Aequinoctialstürme, weht aber im Sommer auch über diese Gegend hinweg bis in die Region des Sommermaximums, bis zu 55° Breite, wo er endlich herabkommend und die Erde berührend die Juliregen veranlaßt.

Die Calmenregion liegt durchschnittlich zwischen 0° und 5° n. B., worin sich ebenfalls die überwiegende Wärme der nördlichen Erdhälfte ausspricht; sie rückt im Sommer etwas mehr nach Norden und im Winter etwas mehr nach Süden, doch nach Mühry nicht so viel, als man bisher annahm. Nach Mühry ist diese Region auf dem Lande dadurch begrenzt, daß innerhalb derselben die West- und Ostseite eines südnördlich ziehenden Gebirges Pflanzendecken tragen, während außerhalb derselben in der Passatregion die Westseiten als Leeseiten wüste sind, da ihnen die Feuchtigkeit durch den Ostpassat entführt, von der Ostseite her aber nicht erneuert wird; die Grenzen der beiderseitigen Gebirgsfruchtbarkeit liegen nach Mühry bei 3° S. und 5° N. Die Ascension führt bald nach Sonnenaufgang aus dem stark feuchten Boden große Dampfmassen in die Höhe, welche oben zu immer stärker sich anhäufenden Haufwolken condensirt werden, den ganzen Himmel verdunkeln, starke Gewitter erzeugen und nicht in Tropfen, sondern in Wasserfäden und Regengüssen herabstürzen, um einem heiteren Himmel Platz zu machen. So verläuft das Wetter in den Calmen mit größter Regelmäßigkeit Tag für Tag, nur beginnen die Regen nach den Solstitien zu immer später, werden schwächer, sistiren auch für einige Zeit und wachsen dann wieder; es ist die fruchtbarste Gegend der Erde, wo keine Stelle einer grünen Pflanzendecke entbehrt, wo Grünen, Blühen und Reifen nicht abwechselnd, sondern fortwährend und gleichzeitig geschehen. — In der tropischen Gegend bis zu 30° ist im Winter und in der regenlosen Zone immer Trockenzeit, weil hier die Ascension zu gering ist, und weil der Nordostpassat aus kühleren in wärmere Gegenden weht und daher mit derselben Dampfmenge immer trockener wird; auch kommt er meist aus trockenen Ländern her. Im Sommer ist in den tropischen Gegenden die Ascension so stark, daß sie tägliche Regen wie in den Calmen hervorbringt, welche indeß nach der Grenze zu immer kürzer werden. Zur regenlosen Zone gehören die Sahara, Aegypten, Arabien, Iran, Gobi, die Mongolei. Die subtropische Zone hat im Sommer ebenfalls nur den Nordost und geringe Ascension, daher Trockenzeit; im Winter aber ist der Aequatorialstrom bei seinem Wehen in der Höhe so abgekühlt, daß er schon hier herabfallend die Erde berührt und dadurch Regen erzeugt; so haben die Canaren, die Azoren und theilweise Nordafrika im Winter Regen; im Frühling ist aber wie im Herbst der Südstrom noch zu warm, um hier schon herunter zu kommen; er trifft die Nordküstenländer des mittelländischen Meeres, strömt aber im Sommer auch meist über diese hinweg, um erst in Deutschland die Erde zu berühren und dort die badereisenverderbenden Juliregen zu erzeugen; die Maximalregenzeiten fallen hier in eine zusammen und rücken um so näher an einander, je näher ein Ort der Ostsee liegt.

3. Schnee, Graupeln, Hagel. Schnee entsteht unter denselben Umständen wie Regen, nur muß die Temperatur unter den Gefrierpunkt gesunken sein; es bilden sich dann bei der Condensation hexagonale Nadelkrystalle, die sich zu den mannigfaltigsten sechsstrahligen Sternen gruppiren; diese in größerer Menge zusammengehäuft bilden die Schneeflocken, welche den zahlreichen von den Kryställchen gebildeten Luftzwischenräumen ihre lockere Beschaffenheit und vermöge der totalen Reflexion ihre weiße Farbe verdanken. Unter Graupeln versteht man kleine Schneebällchen von regelmäßiger Kugelgestalt und höchstens Erbsengröße, welche im Frühling und Herbst bei den raschen Temperaturwechseln entstehen, die mit dem Verdrängen des Südwest durch Nordost verbunden sind. Größere mit einer Eisrinde bedeckte Graupeln nennt man Schloßen. Während der Schnee dem Winter, die Graupeln dem Frühling angehören, fällt der Hagel im Sommer und zwar vorwiegend auch in der heißen Tageszeit, also höchst selten bei Nacht. Der Hagel besteht aus Körnern, deren Kern ein Schneekorn ist, das von concentrischen Eisschalen umlagert ist; durchschnittlich von Haselnußgröße geht der Hagel doch bis zur Größe von Hühnereiern; die Form ist abgerundet, doch nicht genau kugelig, manchmal auch abgeplattet und eckig. Häufig geht der Hagel einem Gewitterregen voraus oder kommt gleichzeitig mit, höchst selten aber nach demselben. Während Schneefälle Tagelang andauern,

605

haben Graupel- und Hagelschläge höchstens 1/4 Stunde Dauer, sind auch viel seltener. In der heißen Zone kommen alle 3 Erscheinungen nur in bedeutenden Höhen vor; in der gemäßigten Zone fallen sie in verschiedenen Gegenden dem Regen ähnlich; doch ist der Hagel häufig durch Localitäten bedingt und zieht in meilenbreiten Streifen mit mehreren Meilen Geschwindigkeiten auf Hunderte von Meilen fort.

Aus der Form der Schneeflocken folgt, daß das Wasser im hexagonalen System krystallisirt; so verschieden die Formen der Schneesterne sind, so tritt doch bei einem Schneefalle vorwiegend eine Form auf, was man durch die Verschiedenheit der Temp. erklärt. Auf der Ostseite fällt der Schnee bei einer niedrigen Temp., ist aber ein Zeichen des herannahenden Südwestes, von Thauwetter; auf der Westseite geht aus Regen allmälig Schnee mit lebhaftem Wechsel und endlich Kälte hervor. — Die Hagelwetter sind an den Westküstenländern Europas häufiger; es kommen dort durchschnittlich jährlich 15, bei uns nur 5 vor; doch hagelt es dabei an einigen Orten oft, an anderen nie; so erhielt die Gegend am Mont d'or nur 1 Hagelfall in 20 Jahren, während es in dem nahen Clermont jedes Jahr öfters hagelte. Eine Wiese, ein Wald macht einen Unterschied; Casalbere in Unteritalien hatte sonst nie Hagel; seit aber ein bewaldeter Bergabhang ausgerodet und beackert ist, hagelt es jedes Jahr. Die zahlreichen Sonderbarkeiten des Hagels machen seine Erklärung sehr schwierig, so daß es viele Hageltheorien gibt: nach Volta tanzen kleine Schneekörner zwischen entgegengesetzt elektrischen Wolken hin und her; nach Leopold von Buch vergrößert sich das fallende Graupelkorn, indem es durch den Fall verdunstet und dafür so viel Wärme verbraucht, daß neue Niederschläge auf dem Korne gefrieren müssen. Vogel, Nöllner und Dufour nehmen an, daß die Bläschen einer Wolke in überkaltetem Zustande seien und daher auf einem durchfallenden Graupelkorne sich fest niederschlagen müßten. Nach Mohr entsteht der Hagel durch eine Condensation des Wasserdampfes an einer tiefer liegenden Luftstelle; hierdurch soll eine starke Raumverminderung und dadurch ein Einsturz der höheren kalten Luftschichten bewirkt werden. Hann machte besonders auf die nach unten trichterförmig sich verengernden Hervorragungen aufmerksam, welche wasserhosenähnlich an der unteren Seite der grauen bis gelben Hagelwolken hängen, und erklärt daher wie Lucas das Hagelwetter für einen kleinen Wirbelsturm. Durch die wirbelförmige Bewegung entsteht im Inneren Luftverdünnung und dadurch sowohl ein Einsturz höherer kälterer Luftmassen, als auch eine sehr gesteigerte Verdunstung mit entsprechend gesteigertem Wärmeverbrauche. Die durch diese Kälte erzeugten Eiskörner werden in dem Wirbel nach außen geschleudert, veranlassen so das prasselnde Geräusch der Hagelwolken, und fallen zu Boden, wenn sie aus dem Bereiche der Centrifugalkraft hinaus gekommen sind.

606 4. **Der Thau und der Reif.** Der Thau ist ein Niederschlag von Wasser in Tropfenform auf Gegenständen der Erdoberfläche aus den nächsten Luftschichten, erzeugt durch die Abkühlung, welche in heiteren Nächten durch die Ausstrahlung der Wärme von den Gegenständen nach dem kalten Himmelsraume bewirkt wird. Erreicht bei der Ausstrahlung der Boden eine Temperatur unter Null, so geschieht der Niederschlag in Form von Eisnadeln und bildet den Reif. Zur Entstehung von Thau und Reif sind demnach heitere, windstille Nächte nöthig; in solchen beginnt die Thaubildung schon vor Sonnenuntergang und ist am stärksten vor Sonnenaufgang. Sie ist am reichlichsten in wasserreichen Gegenden, welche einen sehr reinen Himmel haben. In einer und derselben Gegend geschieht sie stärker in Niederungen, an Gegenständen, die keinem Luftzuge ausgesetzt sind, und deren Ausstrahlung nicht durch irgend eine Bedeckung gehindert ist. Unter sonst gleichen Umständen ist die Bethauung an verschiedenen Körpern um so reichlicher, je stärker deren Ausstrahlung ist, also bei lockeren, rauhen, dunkeln und schlecht leitenden Körpern größer als bei festen und glatten, hellen Körpern, am schwächsten an Metallen.

Eine Wolkendecke verhindert die Thaubildung, weil sie die ausgestrahlte Wärme wieder zurückwirft, der Wind, weil derselbe durch Zuführung neuer Luftschichten die Ausstrahlung ersetzt; ist aber die Luft sehr feucht, so kann auch bei bedecktem Himmel Thau entstehen, wenn nur Windstille, oder auch bei bewegter Luft, wenn nur der Himmel heiter ist; sie ist dann ein Zeichen von nahem Regen, besonders im heißen Sommer, weil heiße und sehr feuchte Luft reichliche Condensation möglich macht. In heißen Ländern besonders an Meeresufern fällt der Thau so reichlich, daß er z. B. in dem regenlosen Peru den Regen ersetzt; dagegen ist er im Inneren großer, wasserarmer, heißer Continente, wie in der Sahara, in Nubien, im Inneren Brasiliens höchst selten. In den Niederungen ist er

stärker als an Abhängen und auf Höhen, weil von den Abhängen die erkalteten Luftmengen in die Tiefe sinken und die Höhen mehr vom Winde getroffen werden; deßhalb bethauen auch Bäume wenig, aber ebenso wenig Pflanzen unter Bäumen. Reif ist an Bäumen stärker, weil diese im Winter nicht von Blättern bedeckt sind. Reif ist nicht mit dem Beschlag zu verwechseln, der im Winter nach starker Kälte beim Einbrechen des Südwestes an Mauern u. a. Dingen stattfindet. Der Beschlag ist an gut leitenden Körpern am stärksten, weil dieselben am kältesten sind, während Thau und Reif bei diesen am geringsten ausfallen. Der Beschlag kommt nur in der Region der veränderlichen Winde vor und bildet sich bei jeder Tageszeit, Thau und Reif aber finden sich in allen Zonen, bilden sich aber nur in der Nacht. Tritt der Südwest nur mit geringer Kraft auf, so daß der kalte Nordost nur allmälig entweicht, so kann der Beschlag an Bäumen so stark sich anhäufen, daß die Aeste zerbrechen; man nennt diesen Beschlag Rauhfrost. Steigt bei dem Eintritte des Südwestes die Temperatur über den Gefrierpunkt, und entsteht Regen, so kann derselbe auf dem noch sehr kalten Boden eine Eisdecke, das Glatteis genannt, bilden. Doch tritt auch die umgekehrte Erscheinung ein, daß Tropfen in überkaltetem Zustande, theilweise durch Gegeneinanderschlagen mit Eisnadeln vermischt, beim Berühren des wärmeren Bodens fest werden und so Glatteis zweiter Art nach wärmerem Wetter veranlassen.

4. Die Elektricität der Luft.

Die atmosphärische Elektricität. Die Luft enthält immer freie Elektricität, deren Quelle noch nicht sicher erkannt, wahrscheinlich aber in verschiedenenen Vorgängen zu suchen ist. Die atmosphärische El. ist bei heiterem Wetter in der Regel pos., während die der Erde neg. ist. Sie wächst und nimmt ab täglich wie der Luftdruck, sie steigt nach Sonnenaufgang einige Stunden und nimmt dann ab bis einige Stunden nach Mittag; dann wächst sie wieder bis 2 St. nach Sonnenuntergang und nimmt dann bis Aufgang ab; sie hat also täglich zwei Maxima und zwei Minima. Auch im Jahreslaufe erreicht sie ein Maximum und zwar im Januar, und im Mai ein Minimum. Nahe an der Erde ist sie gleich Null und wächst an Spannung mit der Höhe. Bei Nebel ist die Luftel. noch stärker pos. als gewöhnlich, bei den übrigen Niederschlägen ist sie aber bald pos., bald neg., wodurch sich die Abnahme der pos. Luftel. bei trübem und windigem Wetter erklärt. 607

Man beobachtet die Luftel. hauptsächlich nach 2 Methoden: die ältere Methode brachte in der Höhe eine oder mehrere isolirte Saugspitzen an, welche mit einem empfindlichen Elektrometer in Verbindung gesetzt wurden und diesem die aufgesogene El. zuleiteten; neuere Beobachter stellen an einem erhöhten Punkte eine isolirte Kugel auf und bringen dieselbe für kurze Zeit mit der Erde in Verbindung; die Luftel. zieht dann die ihr entgegengesetzte El. in die Kugel, so daß diese bei Aufhebung der Verbindung mit der Erde geladen bleibt und dann bei der Einwirkung auf das Elektrometer die der Luftel. entgegengesetzte El. zeigt. Schübler erhielt 10^m vom Boden entfernt eine Divergenz des Elektrometers von 15^0, während in 60^m Höhe die Divergenz 64^0 betrug und bei Nebeln doppelt so groß wurde. — Während man früher nach Volta die Verdunstung, dann nach Pouillet die Verdunstung und den Vegetationsproceß als Quelle der Luftel. anführte, schreibt man jetzt, nachdem Rieß und Reich durch Experimente in diesen Processen keine El. hatten finden können, der Condensation die Erregung der Luftel. zu, wofür allerdings die stärkere El. des Nebels, sowie die starken Blitze bei starken Gewitterniederschlägen zu sprechen scheinen, obwohl man experimentell keine Begründung für diese Ansicht beibringen kann. Nach Lamont ist die pos. El. der Luft nur eine Folge der neg. El. der Erde, nach Meißner eine Folge sämmtlicher Oxydationen; der gewöhnliche Sauerstoff enthält in jedem Molekül ein pos. und ein neg. Sauerstoffatom, ein Atom Antozon und ein Atom Ozon; die Oxydation geschieht meist durch das Ozon, wodurch viel pos. Sauerstoff frei wird und nach Meißner die pos. Luftel. erzeugt. Mit dieser Ansicht trifft die älteste zusammen; Lavoisier, Laplace und Davy schrieben nämlich die Luftel. der Verbrennung zu; es spricht aber gegen dieselbe, daß die Luft hauptsächlich Ozon enthält.

Das Gewitter, eine mit Blitz und Donner verbundene starke Wolkenbildung und Entleerung derselben durch Regen oder Hagel, ist eine el. Erscheinung, der Blitz ist der el. Funke, der Donner ist der Knall derselben. Daß der Blitz ein el. Funke ist, folgerte man schon aus der Uebereinstimmung der Wirkungen beider; der Blitz hat häufig, wie der künstliche el. Funke, Zickzackform, trifft wie dieser vorzugsweise 608

die nächsten und spitzigsten Gegenstände, folgt den besten Leitern wie dieser, entzündet brennbare Gegenstände, schmilzt Metalle, zerstört schlechte Leiter, tödtet lebende Wesen, wie der Funke; er macht Eisen magnetisch, zerstört Magnetismus, stört Magnetnadeln, wie der el. Schlag, und bringt wie viele el. Entladungen den Ozongeruch hervor. Das Vorhandensein von großen Elektricitätsmengen bei Gewittern ist indessen auch direct und zwar zuerst von Franklin und de Romas (1752) mittels des elektrischen Drachens nachgewiesen worden.

Franklin befestigte an einem Drachen einen aufrecht stehenden zugespitzten Draht und ließ den Windvogel bei einem herannahenden Gewitter in der Nähe von Philadelphia aufsteigen; an der hänfenen Schnur war unten ein Stück seidene Schnur befestigt, mittels welcher Franklin den Drachen hielt, während das Ende der Hanfschnur mit einem daran befestigten Schlüssel herabhing. Anfänglich zeigte sich keine Wirkung; als aber die Gewitterwolke dem Drachen näher kam, sträubten sich die losen Fasern der Schnur, und der Schlüssel gab beim Annähern des Fingers el. Funken, die beim Regen stärker wurden. De Romas erhielt 1757 Funken von 10′ Länge und der Stärke eines Pistolenknalles, benutzte aber, um sich zu schonen, einen Funkenzieher, der mit der Erde verbunden war; trotzdem wurde er einmal zu Boden geworfen. Der verdienstvolle Physiker Richmann unterbrach 1753 in Petersburg einen Blitzableiter, um die el. Natur des Gewitters zu studiren, wurde aber von dem aus der Unterbrechungsstelle stürzenden Blitze getödtet, den der anwesende Kupferstecher Sokolow in Gestalt eines Feuerballes nach dem Kopfe Richmanns überspringen sah. Wie nun die gewaltige El. der Gewitterwolken zu Stande kommt, ist nicht bestimmt aufgeklärt. Sie könnte dadurch entstehen, daß die El. der Luft sich immer mehr anhäuft, was bei langer, windstiller Heiterkeit der Fall sein muß, und wodurch sich auch die dem Gewitter vorausgehende Schwüle erklären dürfte, und daß dann die Wolke als guter Leiter auf ihrem rasch durchlaufenen großen Wege alle El. aufsammelt; wäre dies aber der Fall, so müßte die el. Spannung vor einem Gewitter immer mehr zunehmen, wofür keine Beobachtungen vorliegen; man denkt sich deßhalb, die große Menge von El. in einer Gewitterwolke entstehe mit derselben durch plötzliche Condensation und häufe sich so stark an, weil eine plötzliche Zerstreuung derselben nicht möglich sei.

Die Häufigkeit der Gewitter für die verschiedenen Erdgegenden ist sehr verschieden; während in der Polarzone oft in vielen Jahren kein Gewitter vorkommt, findet in den Tropen fast jeden Tag ein solches statt. Im Allgemeinen nimmt die Zahl der Gewitter mit zunehmender geogr. Breite ab; doch wirken auch andere Verhältnisse in ähnlicher Weise wie beim Regen mit; so ist die regenlose Zone fast gewitterlos und sind im Inneren des großen Continentes die Gewitter sehr selten; dagegen sind sie im mittleren Europa häufiger als an den Westküstenländern; während diese nur 6—10 Gewitter jährlich haben, finden in Italien 40, in Deutschland 30, im Osten aber nur 10—12 Gewitter durchschnittlich jährlich statt. Die meisten Gewitter kommen auf die warme Jahreszeit, doch gibt es auch Wintergewitter; im Allgemeinen sind dieselben selten; wo aber Winterregen überwiegt, ereignen sich auch mehr Wintergewitter; so kommen bei Bergen in Norwegen jährlich 7 auf den Winter und 5 auf den Sommer, während Stockholm und der weitere Osten kein Wintergewitter hat. Der Tageszeit nach fallen die meisten Gewitter auf den späten Nachmittag und Abend, seltener auf die Morgenzeit.

Dove unterscheidet Gewitter des aufsteigenden Luftstromes, des verdrängenden Polarstromes und des verdrängenden Aequatorialstromes; die ersteren ereignen sich in den Tropen, die folgenden in der gemäßigten Zone zur Sommerzeit nach längerer heißer Witterung und nach einer durch die Stauung der beiden Luftströme erzeugten Schwüle, und gefolgt von längerer Kühle, die letzteren endlich vorwiegend zur Winterzeit in der gemäßigten Zone bei heftigem Südwest und gefolgt von längerer wärmerer Regenzeit. Da das Gewitter eigentlich in der plötzlichen Bildung dunkler, gährender, nur 300 bis 2000^{m} hoch schwebender Wolken besteht, so gibt es auch stille Gewitter, die Platzregen; doch sind Blitz und Donner das Characteristische des Gewitters. Man unterscheidet Linienblitze und Flächenblitze; die ersteren sind zickzackförmige, manchmal verästelte, scharf begrenzte, oft über 1000^{m} lange Lichtlinien von mehr blauem und weißem Lichte, begleitet von lautem, lange rollendem Donner; die letzteren und häufigeren bilden eine gleichmäßige, röthliche, unbestimmt begrenzte Erleuchtung eines großen Theiles der Himmelsfläche mit leise murmelndem Donner oder ganz ohne Donner; seltenere Blitzformen sind die Schlangenblitze und die Kugel=

blitze oder Donnerkeile. Diese letzteren fahren immer, die Schlangen- und Linienblitze großentheils zur Erde, die Flächenblitze von Wolke zu Wolke; fahren die Blitze zur Erde, was man Einschlagen nennt, so ist der Donner ein starker Krach mit nachfolgendem Prasseln; im andern Falle entsteht durch den langen Weg des Blitzes und durch Reflexion ein langes Rollen, dessen stärkere Schläge von den Absprüngen, sowie von Reflexionen herrühren mögen. Beim Einschlagen trifft der Blitz die höchsten Gegenstände und besten Leiter und geht auf dem Wege in die Erde, der ihm am wenigsten Widerstände bietet. Gute Leiter werden durch den einschlagenden Blitz je nach ihrer Dicke glühend, geschmolzen oder in Staub aufgelöst, schlechte werden zertrümmert, brennbare Gegenstände entzündet; doch kommt es auch vor, daß keine Entzündung stattfindet; in diesem Falle, den man den kalten Schlag nennt, ist wahrscheinlich die Kraft des Schlages zu gewaltig. Menschen und Thiere werden betäubt oder getödtet, Thiere öfter als der Mensch; doch kommen hierbei keine oder nur unerhebliche äußere oder innere Verletzungen vor. Ist der Blitz in das leitende feuchte Erdreich gelangt, so ist er ohne Spur verloren, in die Erde verbreitet; begegnet ihm vorher trockener Sand, so schmilzt er denselben zu Blitzröhren zusammen.

Da Regen häufiger neg. el. ist und bei Gewittern selbst die Luftel. bald pos., bald neg. erscheint, so können bei Gewittern an sich neg. und pos. el. Wolken vorkommen, und so bei hinreichender Annäherung ihre El. in der Luft als Blitz vereinigen; doch reicht hierzu auch die einfache Ladung einer Wolke mit einer Art von El. aus; denn diese zieht in einer benachbarten Wolke oder in einem nahen irdischen Gegenstande die entgegengesetzte El. nach den Principien der Influenz in das genäherte Ende, wodurch ebenfalls die beiden El. sich einander gegenüber befinden und den el. Funken erzeugen. Von welcher Wolke der Blitz ausgeht, von der neg. oder pos., ob er beim Einschlagen von der Erde oder von der Wolke herkommt, ist nicht entschieden; gewöhnlich nimmt man an, daß er im letzteren Falle aus der Wolke zucke; doch sind auch schon Blitze mit aufwärts gehender Bewegung, von der Erde zur Wolke springend beobachtet worden. Ob der Linienblitz nur ein fortschreitender Funke ist, der nur durch die Andauer des Lichteindruckes auf unsere Netzhaut als Linie erscheint, oder ob die Linienform ihm eigenthümlich ist, und ob in diesem Falle der ganze leuchtende Weg oft von mehreren Meilen Länge oder nur ein Theil desselben den elektrischen Blitzfunken ausmacht, ist noch nicht entschieden. Die Zickzackform der Linienblitze erklärt man durch die Verdichtung der Luft vor dem el. Funken und das hierdurch verringerte Leitungsvermögen der Luft, was den Blitz zum Abspringen nach dünneren Luftmassen bewege; doch wird auch diese Erklärung angefochten. Arago behauptet, auf 1000 Flächenblitze komme nur ein Linienblitz; man hält diese Angabe für übertrieben und für veranlaßt durch Linienblitze hinter dunkeln Wolken, die dann nur als Wolkenleuchten erscheinen. Nach Kundt (1868) verhält sich die Zahl der Zickzackblitze zu der der Flächenblitze wie 6 : 11, und sind nach Spectralbeobachtungen die ersteren eigentliche el. Funken und zur Erde herabgehend, die letzteren Büschellicht von Wolke zu Wolke. Seltene Erscheinungen sind die Schlangen- und die Kugelblitze; die letzteren erscheinen als dicke Feuerkugeln mit einem Schweife und zerplatzen mit einem lauten Knalle; sie haben eine Dauer bis zu 10 Sec., während die übrigen Blitze nur kleine Bruchtheile einer Secunde anhalten. — Der Donner entsteht durch die Lufterschütterung, welche mit dem el. Funken verbunden ist, und welche oft als ein Auseinanderwerfen und Wiederzusammenschlagen der Luftmassen aufgefaßt wird. Die längere Dauer des Donners erklärt man daraus, daß der Blitz eine bedeutende Länge besitze, und daß daher der Schall von den verschieden entfernten Punkten des Blitzes erst in verschiedenen Zeiten zu uns gelangen könne; doch ist das Rollen des Donners meist länger, als nach dieser Idee die Rechnung ergibt, wodurch man zu der Annahme gedrängt ist, daß die Reflexion des Schalles an Gebirgswänden, Wolken u. s. w. den Donner verlängere, wofür allerdings das lange Rollen des Donners in Gebirgen spricht, während dieselbe Beobachtung auf Meeren dagegen geltend gemacht wird. Für das Ab- und Zunehmen, das Poltern des Donners führt man ebenfalls die Reflexion und die Absprünge und Verzweigungen als Erklärungen an; Kämtz hält es für eine Schallinterferenz. Als ein einfacher, scharfer Knall tritt der Donner auf, wenn der Beobachter von allen Theilen des Blitzes ziemlich gleich weit entfernt ist; man hält daher einen solchen Donnerschlag für ein Zeichen eines ganz nahen Einschlagens. Zur ausreichenden Einsicht in alle Verhältnisse des Donners fehlt noch sehr viel; möglicherweise sind alle angeführten Eigenthümlichkeiten nur Modificationen und allmälige Ausgleichungen der Lufterschütterungen; es ist nämlich unmöglich, daß eine große auseinander geschleuderte Luftmasse sich beim Wiederzusammenschlagen plötzlich beruhigen könne; die zusammenschlagenden Massen müssen viel-

mehr theilweise oftmals zurückgeworfen werden, theilweise nach dem Gesetze der Trägheit über die Stelle des Zusammenschlagens hinausgehen, dann zurück kehren, abermals aus einander gehen, und so erst nach längerer Zeit unter immer leiserem Grollen zur Ruhe gelangen. Aus dem Zeitzwischenraume zwischen Blitz und Donner kann man die Entfernung des Blitzes von dem Beobachter berechnen, da das Licht des Blitzes sich nahezu momentan auf diese Entfernung fortpflanzt, während der Schall für je 333m eine Sec. Zeit braucht; so viele Sec. also zwischen Blitz und Donner verfließen, so viel mal 333m ist der Blitz vom Beobachter entfernt. Ist der Blitz mehr als 3 M. von uns entfernt, so hört man den Donner nicht mehr, weil sich der Schall durch die Luft viel unvollständiger fortpflanzt als durch feste Körper; daher gibt es Blitze ohne Donner, ja es gibt auch solche aus heiterem Himmel und solche, welche in größter Nähe ohne nachfolgenden Donner beobachtet wurden, sowie umgekehrt Donnerschläge ohne Blitz. Die Dauer des Donners gibt ein Beobachter auf 2 bis 80 Sec. an

Nach Mohn (1874) ist die Geschw. der Gewitter in Norwegen durchschnittlich 38km in der Stunde und zwar meist in der Richtung von SW nach NO. Es gibt Gewitter, die Hunderte von Meilen weit fortziehen; während dessen ist auf verschiedenen Stellen des Weges die Stärke sehr verschieden, manchmal ziehen sie für einige Zeit wieder rückwärts und dann abermals vorwärts; oftmals bewegt sich das Gewitter in entgegengesetzter Richtung wie die Wolken. Daraus folgt, daß das Gewitter nicht in einer Wolke oder Wolkenmasse seinen Sitz hat, die über die Erde hinzieht und sich nach und nach entladet, sondern daß die el. Zustände, welche das Gewitter erzeugen, von Wolke zu Wolke fortschreiten. Außer den Ascensionsgewittern, die in den heißen Zonen immer und in gemäßigten Gegenden in heißen Sommerzeiten vorkommen, unterscheidet die neuere Meteorologie noch Wirbelgewitter; solche sind besonders die Wintergewitter Norwegens, die bei starken südwestl. und westl. Stürmen entstehen und sich auf der Südostspitze des Wirbels bilden, wo die Luft warm und feucht ist; auch die Wintergewitter Frankreichs, Schottlands und Irlands sind als Folgen der Wirbelstürme bekannt, während umgekehrt die Windhosen, Tornados und Cyclonen immer mit Gewittern verbunden sind und an der warmen Seite der Sommerwirbel der gemäßigten Zone Gewitter auftreten.

Da der Blitz den nächsten besten Weg ins feuchte Erdreich nimmt, so trifft er zunächst hoch hervorragende, besonders spitz zulaufende Gegenstände, wie Thürme, Maste, Bäume, auf freiem Felde einzeln stehende, im Walde hervorragende Bäume, auf freiem Felde auch Heu- und Fruchthaufen, aufrecht stehende Menschen und Thiere; auf seinem Wege zieht er Metalle vor, durchbricht selbst Mauern, um dieselben zu erreichen, zerschmilzt und zerstäubt sie, wenn sie zu dünn sind; größere Menschen- und Thiermengen bilden durch ihren Dunststrom einen besseren Leiter, ebenso Luft- und Rauchzüge. Am heftigsten sind immer die Blitzwirkungen an den Stellen des Auf- und Absprunges, sind oft nur hier merklich. Die vom Blitze Erschlagenen werden meist momentan getödtet, werden nach ihrem Tode noch in der früheren Lage, mit offenen Augen angetroffen; manchmal finden sich unbedeutende Flecken und Streifen auf der Haut, im Inneren keine Zerstörung; die nur Betäubten haben nach der Genesung keine Erinnerung des Vorganges. Manche verspürten Besserung ihrer Gesundheit. Nach Boudin werden in Frankreich im Durchschnitt jährlich 100 Menschen vom Blitze getödtet. Als Vorsichtsmaßregeln merke man: In Zimmern hüte man sich, unterbrochene Leitungen mit seinem Körper auszufüllen, bleibe entfernt von Wänden, Fenstern, Kaminen, Spiegeln, Glockenzügen, öffne ein Fenster, aber vermeide den Zug; auf der Straße bleibe man in der Mitte, auf dem Felde halte man sich in der Mitte zwischen Bäumen, auf freiem Lande mache man sich so klein als möglich; schnelles Laufen eines Einzelnen erhöht die Gefahr nicht wesentlich, wohl aber schnelles Laufen von Vielen hinter einander.

Der Blitzableiter (Franklin 1753) dient zum Schutze eines Gebäudes vor den Wirkungen des Blitzes; er soll nicht nur Blitzschläge verhüten, sondern auch, wenn solche unvermeidlich sind, sie unschädlich in die Erde leiten. Zu dem Zwecke besteht er aus einer das Gebäude weit überragenden, zugespitzten Metallstange, der Auffangestange, welche in ununterbrochener, vollkommen leitender Verbindung mit einer in die feuchte Erde sich verzweigenden Ableitung steht. Zieht über solche Stangen eine el. Wolke, so zieht diese die entgegengesetzte El. der Erde durch die Spitze der Stange heraus und neutralisirt sie und sich hierdurch, wodurch Blitze verhütet werden; wenn aber die Menge der El. der Wolke zu groß ist und sie dennoch auf das Gebäude überspringt, so muß sie durch die Spitze der Stange aufgefangen und in die Erde geleitet werden. Um diese Zwecke zu erfüllen, muß die Spitze möglichst vollkommen und rein metallisch, die Leitung ununterbrochen und stark genug sein, um nicht zu schmelzen, und die Ableitung nicht in trockene Erde oder geringe, abgeschlossene Wassermengen, sondern in das feuchte Erdreich, in Flüsse stattfinden. Kupferdrahtseile mit Silberspitzen bilden die besten Blitzableiter; der Billigkeit halber wendet man aber gewöhnlich eiserne Stangen mit vergoldeter Spitze oder einem Ende von

Platin oder Silber an. Nach vielfacher Erfahrung schützt eine Auffangestange höchstens auf einen Umkreis, dessen Radius gleich der 1½fachen Länge der Auffangestange ist; längere Gebäude müssen daher mehrere Auffangestangen haben, welche durch eine über der Dachfirste hinlaufende Stange verbunden sind, von der die Leitung zum Boden herabgeht. Diese Stangen haben am besten einen kreisförmigen Querschnitt von wenigstens 15mm Durchmesser (bei Kupfer 5mm); mit ihnen müssen alle Metallmassen des Gebäudes in leitender Verbindung stehen, weil dieselben sonst für sich den Blitz anziehen. Die Ableitungsstange muß, wo sie in die Erde eindringt, von Kohle umgeben sein, um sie vor Rosten zu schützen und die Leitung zu verbessern; kann man sie in große Wassermassen führen, so reicht es aus, sie mit einer Endplatte zu schließen; sonst muß man durch mehre Endplatten den Ausfluß der El. in die Erde möglichst erleichtern.

Häufig empfinden Menschen während eines Gewitters einen elektrischen Schlag, oder es werden Menschen und Thiere getödtet, ohne direct vom Blitze getroffen zu sein, aber in demselben Augenblicke, wo an entfernter Stelle eine Blitz stattfand; in solchen Momenten bemerkt man auch an nicht getroffenen Gegenständen Funken. Man nennt diese Erscheinungen den **Rückschlag**; derselbe beruht darauf, daß die el. Wolke die entgegengesetzte El. der Erde anzog, die gleichnamige aber in entfernte Gegenstände abstieß, daß dann die erste durch den Blitz neutralisirt wurde, und nun die abgestoßene El. der Abstoßung ledig als gewöhnliche freie El. wirken konnte. Eine andere Nebenerscheinung der Gewitter ist das **Wetterleuchten**, hellleuchtende Flächenblitze bei dunkler Nacht ohne Donner. Sie sind entweder der Widerschein entfernter Gewitter, können deßwegen auch am hellen Himmel auftreten, oder das ruhige Ausströmen von Büschellicht aus schleierartigen Wolkenüberzügen. Der letzteren Erscheinung ähnlich ist das **St. Elmsfeuer**, bei den Alten Hermesfeuer oder auch Castor und Pollux genannt; sie besteht darin, daß bei stark elektrischem Zustande der Luft in dunkler Nacht, bei Regen, Schnee und Sturm, besonders im Winter bei Südwestwind, häufig auf spitzen oder scharfkantigen Gegenständen, wie Masten, Helm- und Lanzenspitzen, Pferdeohren, Huträndern, Baum- und Buschzweigenden kleine büschelartige Flämmchen erscheinen, welche manchmal mit leisem Rauschen verbunden sind; doch hat man auch solche Flämmchen auf offenem Meere, auf ebenen Gegenständen wahrgenommen, und mögen manche Irrlichterscheinungen ähnlicher Natur sein.

609 **Das Nordlicht**, eine Erscheinung, welche in den Polargegenden fast jede Nacht, in niederen Breiten selten uud in den tropischen Gegenden gar nicht vorkommt, beginnt gewöhnlich kurz nach der Abenddämmerung mit einem dunkeln Segment am nördlichen Himmel, dessen höchster Punkt im magnetischen Meridian und dessen Mittelpunkt in der Richtung der Inclinationsnadel liegt, und welches von einem hellen Saume eingefaßt ist. Dieser Saum wird bald breiter und glänzender, und nach einiger Zeit schießen Strahlen von demselben in radialer Richtung nach allen Himmelsgegenden über das Segment hinaus, welche etwa die Breite des Mondes haben, aber an Länge und Glanz im lebhaftesten Wechsel begriffen sind, sich bald über 90° hoch über das Segment erheben, bald bis zum Verschwinden verkleinern und den ganzen Himmel mit ihrem Glanze erhellen. In den höchsten Breiten, wo die Erscheinung am brillantesten ist, vereinigen sich die am höchsten emporgestiegenen Strahlen zu der sogenannten Krone, welche südlich vom Zenith an der Stelle liegt, wohin der Südpol der Inclinationsnadel zeigt. Das Nordlicht gehört der Atmosphäre an, da es an der Drehung des Sternhimmels keinen Antheil nimmt; seine Höhe wird verschieden, von 20 bis 100 Meilen angegeben. Während eines Nordlichtes zeigt die Declinationsnadel starke Schwankungen bis zu 5°, die Intensität des Erdmagnetismus ist vor der Erscheinung am größten, nach derselben am kleinsten; bei genauerer Untersuchung zeigt sich, daß die Strahlen die Richtung der Inclinationsnadel besitzen. Der Zusammenhang des Nordlichtes mit dem Erdmagnetismus ist hiernach unverkennbar, und hierdurch, da dieser nach Ampères Theorie aus parallelen elektrischen Strömen besteht, auch der Zusammenhang mit der Elektricität. Die Zahl der Nordlichter ist jährlich zur Zeit der Nachtgleichen am größten, zur Zeit der Solstitien am kleinsten; doch ist die jährliche Zahl nicht jedes Jahr dieselbe, sondern erreicht etwa alle 11 Jahre ein Maximum, das mit der Maximalzeit der Sonnenflecken zusammenfällt, und wie diese in dem Zeitraume von 5 Perioden, also von 56 Jahren wieder eine Ab- und Zunahme zeigt. Das Spectrum des Nordlichtes besteht nach Untersuchungen von Angström (1868 und 1874) aus einer einzigen grüngelben scharfen Linie, die mit keiner bekannten Spectrallinie coincidirt. Vogel (1871) beobachtete auch noch verwaschene grüne und blaue Streifen und eine rothe Linie in den rothen Nordlichtstrahlen, welche Linien mit denen des Stickstoffs bei starker Verdünnung und niedriger Temperatur zusammen fallen sollen. — Man hält meist das Nordlicht für eine elektrische Ausströmung; die Entstehung derselben kann man sich folgendermaßen denken: Nach Ampères Theorie besteht der Erdmagnetismus aus parallelen elektrischen Strömen, welche ungefähr ostwestlich, senkrecht zur magnetischen

Achse der Erde, dieselbe umkreisen, und welche nach Zöllner (s. 591.) durch das Eintauchen von inneren Zacken der Erdrinde in die südwestlichen Oberströme des feurigflüssigen inneren Erdmeeres entstehen; diese el. Ströme haben den Parallelkreisen analog nach den magnetischen Polen zu einen kleineren Durchmesser, laufen also in diesen Polen zu Spitzen zusammen. Nun ist in diesen Strömen die neg. El. offenbar im Ueberschusse vorhanden, da ja die Erde neg. el. ist; diese neg. El. muß aus den Polspitzen ausströmen und zwar nach den Gegenden zu, wo pos. El. in größerer Menge vorhanden ist, d. i. nach den höheren Luftschichten der gemäßigten Zone, und zwar in den Luftschichten, welche der El. den geringsten Widerstand bieten, d. i. in so hohen, daß die Luftspannung nur Bruchtheile eines Millimeters beträgt, nicht in höheren, weil dort der Leitungswiderstand wieder größer wird.

5. Die Beobachtung und Vorausbestimmung der Lufterscheinungen.

610 **Die Beobachtungsinstrumente** wurden meist schon bei den zu Grunde liegenden physikalischen Eigenschaften oder bei den betreffenden Lufterscheinungen angegeben; das Instrument zum Beobachten der Temperatur der Luft, das Thermometer, sowie des Maximums und Minimums der Temperatur s. 47. u. 401.; das Instrument zum Beobachten des Luftdruckes, das Barometer s. 187.; die Instrumente zur Beobachtung des Feuchtigkeitsgrades der Luft, das Hygrometer und das Psychrometer s. 602.; das Instrument zur Beobachtung der Elektricität der Luft, das Luftelektrometer, s. 607.; das Instrument zur Messung der Regenmenge, das Ombrometer, s. 604.; das Instrument Pouillets zur Beobachtung der erwärmenden Kraft der Sonnenstrahlen, das Pyrheliometer, s. 390.; zur Beobachtung der von den Wolken reflectirten Wärmestrahlen im Verhältnisse zu der bei heiterem Himmel erfolgten Ausstrahlung dient das Aethriometer, ein Differentialthermometer, dessen eine Kugel von einem nach dem Himmel gewendeten Hohlspiegel umgeben ist; zur directen Messung der Ausstrahlung dient Pouillets Actinometer, ein in Eiderdaunen gebettetes Thermometer. Das Cyanometer zum Messen der Bläue des Himmels ist ein Farbenkreis mit 51 Abstufungen von Weiß durch Blau zu Schwarz, von welchen jede folgende von der vorhergehenden in 8′ Entf. nicht mehr unterschieden werden kann; Weiß hat die Nummer 1; aus der Nummer, mit welcher das Himmelblau übereinstimmt, hat man ein Maß für die Reinheit desselben. Das Diaphanometer, der Luftdurchsichtigkeitsmesser, besteht aus weißen Kreisflächen mit schwarzen Scheiben von 1, 2 ... Zoll Durchmesser; aus der Größe der Scheibe, die in einer bestimmten Entf., außer den kleineren noch verschwindet, schließt man auf die Reinheit der Luft. Den Gehalt der Luft an Sauerstoff mißt das Eudiometer, den Gehalt an Kohlendioxyd das Anthrakometer, den Gehalt an Ozon das Ozonometer; die Menge des in der Nacht niedergeschlagenen Thaues wird mittels des Drosometers gemessen, das aus Flocken von Wolle, Seide oder Schwanenpelz besteht, die Abends und Morgens gewogen werden. Zur Messung der Windstärke und der Windrichtung dient das Anemometer; s. den Meteorograph 611. — Aus den Einzelbeobachtungen werden die Mittelwerthe bestimmt, indem man die Summe von möglichst vielen Einzelresultaten durch ihre Anzahl dividirt; größere Genauigkeit wird hierbei durch die graphische Darstellung möglich, welche außerdem einen raschen Ueberblick über die Veränderung einer Erscheinung im Laufe der Zeit, das Auftreten von Maxima und Minima u. drgl. gestattet. Man trägt zu dem Zwecke auf eine Linie als Achse die Zeiteinheiten als gleiche Strecken hinter einander auf, errichtet an den Endpunkten derselben Lothe und trägt darauf die Einheiten der gemessenen Wettererscheinung in beliebig gewählten gleichen Strecken auf; verbindet man die Endpunkte dieser Lothe durch eine zusammen-

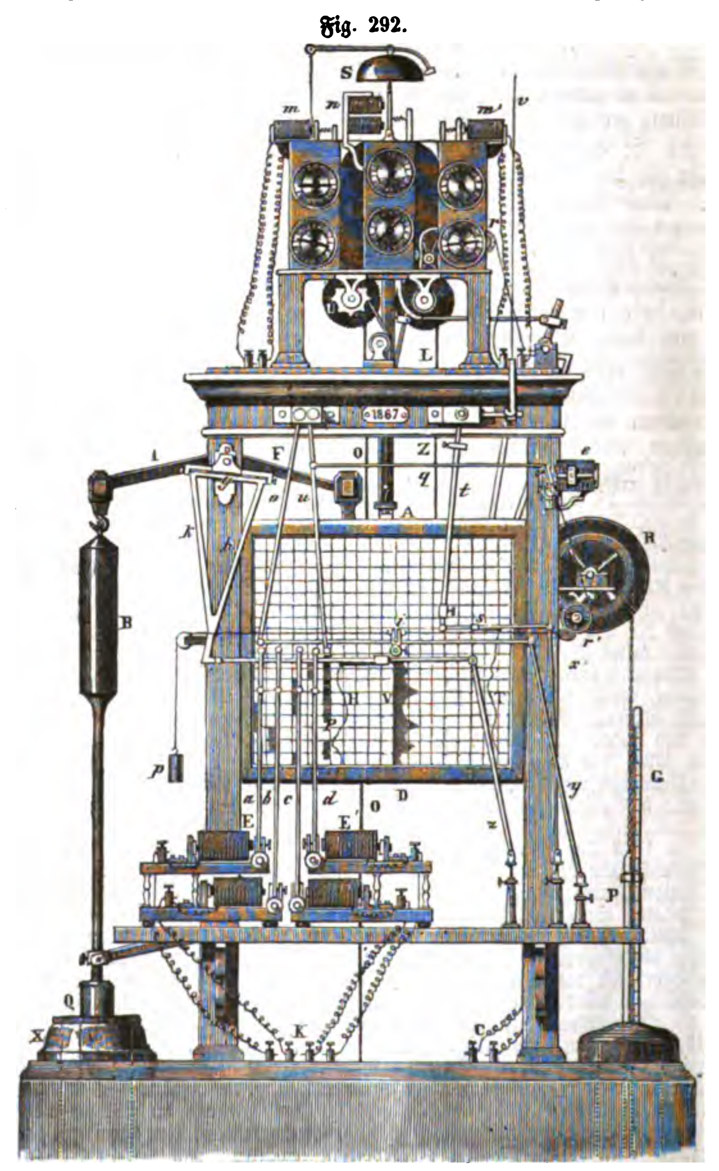
hängende Curve, so gibt diese ein deutliches Bild des Verlaufes der Wettererscheinung. Den genauesten Mittelwerth aller aufgetragenen Werthe erhält man, wenn man den Inhalt der von der Curve und der Achse eingeschlossenen Fläche durch die Länge der Achse dividirt. Den Inhalt bestimmt man hierbei, indem man die durch die einzelnen Lothe gebildeten Paralleltrapeze addirt, oder einfacher, indem man das allerdings kostspielige Planimeter benutzt, welches in kürzester Zeit durch einfache Manipulation den Inhalt einer beliebigen Fläche mechanisch bestimmt. Noch genauer werden die so erhaltenen Mittelwerthe, wenn die Curve ein vollständig genaues Abbild des Verlaufes der Erscheinung ist; dies ist sie nur dann, wenn die Curve von der Wettererscheinung selbst aufgezeichnet wird; hieraus ergibt sich die Wichtigkeit selbstregistrirender Wetterinstrumente, der Meteorographen. Diese Wichtigkeit folgt aber auch daraus, daß die Wettergesetze um so deutlicher erkannt werden können, je längere Reihen wohlgeordneter Beobachtungen vorliegen; so sind die Dove'schen Gesetze aus den fast 150 Jahre umfassenden Berliner Beobachtungen geschlossen worden. Je genauer man aber die Wettergesetze kennt, desto sicherer ist ein Schluß auf die Ursachen der Wettererscheinungen möglich, und desto mehr wird eine Vorausbestimmung des Wetters wahrscheinlich; außerdem kennt man dann auch genauer die Abweichungen des Wetters der einzelnen Orte von den Gesetzen, an deren Studium die Meteorologie jetzt nach der Aufstellung der allgemeineren Gesetze ihre Hauptaufgabe findet, so wie die Ursachen dieser Abweichungen, und hierdurch abermals einen Factor zu einer künftigen Vorherbestimmung des Wetters.

611 Die Mittel, die bis jetzt zur Vorausbestimmung des Wetters zu Gebote stehen, halten sich noch innerhalb bescheidener Grenzen; eine sichere Bestimmung auf mehr als 2 Tage ist noch unmöglich, und auch unter den auf 1 — 2 Tage unternommenen Voraussagungen trifft durchschnittlich nur etwa die Hälfte ein; noch schwieriger ist es, bei dem Wehen von Westwinden Regen und Sonnenschein für die nächsten Stunden festzustellen. Die Vorausbestimmung auf 1 oder 2 Tage gründet sich darauf, daß in der gemäßigten Zone das Wetter durch die 2 Passatwinde bedingt ist, daß Nordost im Sommer helles warmes, im Winter helles kaltes Wetter bringt, der Südwest dagegen im Sommer feuchtes und kühleres, im Winter warmes Wetter erzeugt. Wenn bei heiterem Nordost, am hellen, blauen Himmel lange, weiße, südnördliche Streifen auftauchen, als ob nach Goethes Ausdruck der Himmel mit silbernen Besen gekehrt wäre, so ist dies ein Zeichen, daß der Südwest schon hoch über uns weht; seine leichte Luft wirkt dann auch schon auf das Barometer, das Quecksilber fällt; das Hygrometer zeigt etwas mehr Feuchtigkeit, die Insectenschwärme fliehen die Feuchtigkeit der höheren Luft, sie kommen herab, und ihre Jäger, die Schwalben folgen ihnen; in Gebirgen haben die höchsten Spitzen einen Hut. Zeigen dann telegraphische Depeschen das Wehen des Südwest in Südfrankreich und Spanien an, so kann man mit Sicherheit in 1—2 Tagen trübes Wetter erwarten. Dauert es aber nur noch Stunden, bis der Südwestregen beginnt, so ist das Barometer stärker gefallen, das Hygrometer zeigt nahezu Sättigung mit Wasserdampf, an hohen Bergen zieht sich ein Nebelstreif herab. „Hat der Pilatus einen Hut, bleibts Wetter noch gut, hat er einen Degen, gibts Regen" (Luzerner Wetterregel). In ähnlicher Weise haben manche locale Wetterregeln längere Beobachtung als Grundlage und verdienen deßhalb manchmal Vertrauen. Ein Voraussagen der Herrschaft des Südwest auf längere Zeit wäre möglich, wenn sich Leverriers Angabe bestätigen würde, daß jeder Südwest von einem Wirbelsturme eingeleitet wird, und daß die Wirbelstürme auf dem Golfstrome ihren Anfang nehmen, und wenn auf Inseln des Golfstromes meteorologische Stationen errichtet wären, welche telegraphisch mit meteorologischen Centralstationen Europas in Verbindung ständen. Das Eintreffen des Nordost nach Südwest ist noch schwieriger vorauszubestimmen, besonders im Sommer, weil der locale Nordwest dabei längere Zeit anhalten kann; wenn im Winter nach Regen Schnee eintritt, wenn das Barometer steigt und das Hygrometer eine Abnahme der Feuchtigkeit anzeigt, so ist die Herrschaft des Nordost zu erwarten. Indessen ist die Erkenntniß von Nordost und Südwest im Voraus noch nicht ausreichend, da der Wechsel zwischen beiden sehr verschieden ist; während der Wind manchmal an einem Tage mehrere Male durch die ganze Windrose läuft, bleibt er ein anderes Mal wochenlang constant; auch gibt es heitere Tage bei Südwest, trübe, Regen- und Sturmtage bei Nordost. Zur Einsicht

in alle diese Abweichungen ist eine genaue Aufzeichnung des vollständigen Wetterverlaufes von großem Werthe, besonders dann, wenn alle Wettererscheinungen zusammen graphisch auf eine Tafel gezeichnet werden; dieses besorgt selbstregistrirend

der Meteorograph (Secchi 1862—1867). Fig. 292 und 297 stellen die vordere und hintere Front des Apparates dar, welcher die Wettererscheinungen graphisch auf 2

Fig. 292.



Tafeln schreibt, die von dem Uhrwerke auf dem Kopfe der Maschine herabgelassen werden, die eine in $2^1/_2$, die andere in 10 Tagen, und welche mit einem Coordinatennetze überzogen sind, dessen senkrechte Strecken die einzelnen Zeiten vorstellen, während die wagrechten Strecken die einzelnen Wettergrößen angeben. Die Schwankungen des Luftdruckes werden

von Morlands Wagbarometer aufgezeichnet. In das gußeiserne, mit Quecksilber gefüllte Gefäß X taucht mit einer Holzflantsche Q das eiserne Barometerrohr R, das ebenfalls Quecksilber und das Torricellische Vacuum enthält; wenn durch Erhöhung des Luftdruckes das Quecksilber in B steigt, so fällt es in X, das Rohr taucht weniger tief ein, verliert weniger von seinem Gewichte, wird dadurch schwerer und zieht stärker an dem Wagbalken JF; so wird dieser Wagbalken bei Veränderungen des Luftdruckes hin- und hergewiegt und mit ihm der lange, dreiseitige Hebel gkh, dessen unteres Ende wegen seiner Länge einen großen Bogen beschreibt, und demnach eine wagrechte Stange hin und herführt, deren Mitte durch den nach entgegengesetzter Richtung sich drehenden Hebel z eine wagrechte geradlinige Bewegung erhält; in der Mitte ist ein die Tafel berührender Stift befestigt, der vermöge seiner wagrechten hin- und hergehenden Bewegung auf die herabgehende Tafel die Luftdruckcurve H schreibt. — Die Temperatur wird durch ein Krell'sches Drahtthermometer notirt; im Freien ist an geeigneter Stelle ein 17^{m} langer Kupferdraht ausgespannt; wird dieser durch Abkühlung verkürzt, so zieht er an einem federnden Winkelhebel, und übt so mittels des Drahtes v (Fig. 292) einen Zug auf einen zweiten Winkelhebel aus, der den Hebel t seitwärts zieht; das untere Ende desselben beschreibt einen Kreisbogen; da an diesem eine wagrechte Stange s befestigt ist, deren zweites Ende mittels des Hebels x einen entgegengesetzten Bogen beschreibt, so hat auch hier die Mitte der Stange s eine wagrecht hin- und hergehende Bewegung, welche durch einen Stift auf die Tafel geschrieben wird. — Rein mechanisch wird auch noch die Regenmenge aufgezeichnet. Ein weiter Trichter fängt auf dem Dache den Regen auf und führt ihn in das engere Gefäß rechts am Fuße der Maschine, wodurch der Schwimmer auf diesem Gefäße stark steigt; dieser Schwimmer hängt an einer über die Rolle R gehenden, durch ein Gegengewicht gespannten Kette, welche sonach beim Steigen und Fallen des Schwimmers die Rolle dreht. Durch das Uhrwerk wird nun vom Mittelpunkte der Rolle nach dem Umfange hin ein Schreibstift geführt, der im Ruhezustande der Rolle eine gerade, radiale Linie auf über dieselbe gebreitetes Papier zeichnet, im bewegten Zustande aber eine krumme Linie, aus deren Länge die Regenmenge zu erkennen ist. — Die Regenzeit wird mit Hilfe des galvanischen Stromes notirt; zur Unterbrechung des Stromes dient der schwingende Nachen (Fig. 293), der an einer Stelle des Daches aufgestellt ist, die rasch Regen sammelt, und welcher vermöge einer Aufbiegung des Bodens in dessen Mitte bald rechts bald links herabsinkt und dadurch bald bei a, bald bei b den Strom schließt, bald in der Mitte schwebend denselben öffnet, indem der eine Poldraht zur Achse des Nachens geht. Ist der Strom geschlossen, so zieht das Hufeisen e (Fig. 292) einen Anker und mittels der Stange q einen Hebel seitwärts, der einen Schreibstift trägt und daher einen kleinen Strich auf die Tafel zeichnet; wenn der Strom durch das Schwingen des Nachens sich öffnet, so wird der Hebel durch eine Feder wieder zurückgezogen, um gleich nachher einen gleichen Strich aufzuzeichnen, so entsteht eine kleine Strichsäule p, aus deren Länge die Regenzeit abgelesen wird. — In ähnlicher Weise wird auch die Windrichtung aufgeschrieben. Der eine Poldraht einer el. Batterie geht an die Achse der Wetterfahne (Fig. 294), der andere theilt sich in 4 Zweige, welche um die 4 Hufeisen E und E′ (Fig. 292) im Fuße der Maschine und dann an die 4 metallischen Sectoren der Grundplatte der Fahne (Fig. 294) gehen, welche von einander isolirt sind, und auf welchen eine von der Achse ausgehende Feder O schleift; da dieselbe der Fahne parallel steht und mit ihr gedreht wird, so wird je nach der Windrichtung der Strom in einem anderen der 4 Hufeisen geschlossen; dieses zieht alsdann seinen Anker und mit ihm den Hebel d (Fig. 292) an, der an seinem Ende einen Schreibstift trägt, durch welchen ein Strich auf die Tafel gezeichnet wird. Nun ist die Drahtleitung so eingerichtet, daß der

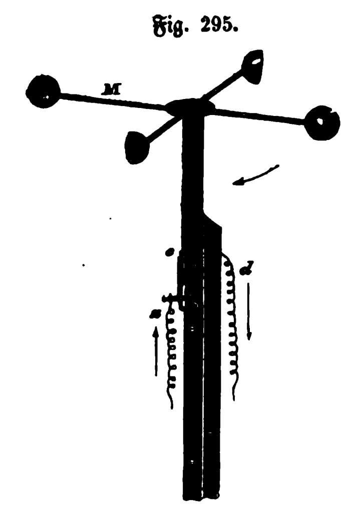
Fig. 293.

Fig. 294.



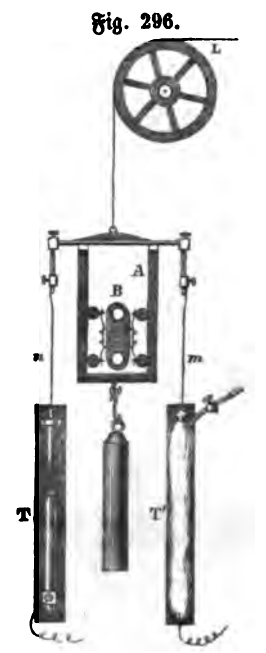
Strom durch einen Schraubenstift auf den Anker und von diesem um das Hufeisen geht; folglich ist der Strom unterbrochen, sowie der Anker an- und dadurch von dem Stifte weggezogen wird. Mit dieser Unterbrechung ist aber auch die Anziehung zu Ende, und deßhalb werden Anker und Hebel von einer Feder zurückgezogen; hierdurch wird die Berührung mit dem Schraubenstifte wieder hergestellt, der Strom ist abermals geschlossen, der Anker wird wieder angezogen und ein zweiter Strich gezeichnet. So lange also die schleifende Fahnenfeder denselben Sector der Grundplatte berührt, so lange öffnet und schließt sich der Strom eines und desselben Hufeisens selbstthätig, so lange macht also der Stift kleine Striche über einander; es entsteht eine kleine Strichsäule, aus deren Länge die Dauer eines Windes zu erkennen ist; da durch jeden anderen der 4 Hauptwinde ein anderes Hufeisen in Thätigkeit gesetzt wird, und ein anderer der 4 Hebel a, b, c, d Striche zeichnet, so ist leicht die Windrichtung zu ersehen. — Für die Windstärke, als Anemometer, wird Robinsons Schalenkreuz benutzt; dasselbe (Fig. 295) besteht aus 4 hohlen, offenen Halbkugeln von Messingblech, welche an den Enden eines horizontalen Stabkreuzes M so angebracht sind, daß sich ihre Höhlungen nach allen 4 Weltgegenden öffnen und sich auf der Spitze eines Thurmes durch den Wind um eine verticale Achse drehen, und zwar nach zahlreichen Beobachtungen mit dem 3ten Theile der Windgeschwindigkeit, so daß man aus der Zahl der Umdrehungen jene berechnen kann.

Fig. 295.



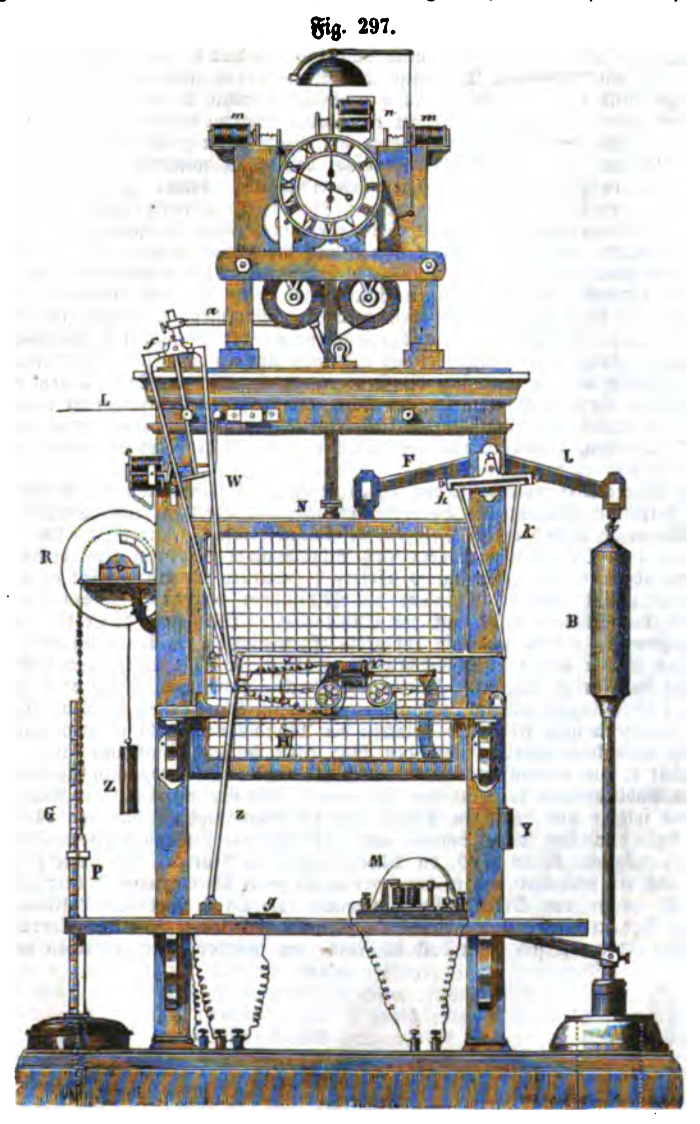
Diese Zahl wird durch ein elektrisches Zählwerk notirt. Der eine Poldraht a geht an die Achse des Kreuzes, der andere d an eine neben derselben sitzende Feder c, welche bei jeder Umdrehung einmal von einer Nase der Achse berührt wird, hierdurch den Strom für einen Moment schließt, und so das Hufeisen n (Fig. 292) für einen Moment magnetisch macht, wodurch der Anker bei jeder Umdrehung einmal angezogen und dann von einer Feder wieder zurückgeführt wird. Neben diesem Elektromagnet n sitzt ein Uhrwerk, auf welches der Magnet als Regulator wirkt, und dessen Zeiger demnach die Zahl der Umdrehungen angibt. Doch wird die Windstärke auch graphisch dargestellt; eine Walze des Uhrwerkes wickelt nämlich eine Schnur auf, die über die Rollen r und r' gehend den Stift i seitwärts zieht, der vermöge der Geradführung oy in jeder Stunde eine gerade Linie V beschreibt, die um so länger ist, je schneller das Uhrwerk läuft, d. h. je schneller der Wind weht. Nach Ablauf einer Stunde wird jene Walze für einen Moment aus dem Uhrwerke geschaltet und der Stift i durch das Gegengewicht p zurückgeführt, um in der nächsten Stunde eine neue Linie zu ziehen, deren Länge die Geschwindigkeit des Windes ersehen läßt. — Am complicirtesten ist der Mechanismus für die Notirung der relativen Feuchtigkeit der Luft, welche ebenfalls als gerade Linie aufgezeichnet wird, welche die Differenz des feuchten und des trockenen Thermometers T' und T eines August'schen Psychrometers (Fig. 296) angibt. Alle Viertelstunden drückt eine excentrische Scheibe des Uhrwerkes (Fig. 297) auf den Hebel a und durch denselben den großen dreiseitigen Hebel W nach links; hierdurch geht auch der Faden L nach links und senkt so den Rahmen AB (Fig. 296) mit seinen 2 Platindrähten m und n in das Quecksilber der beiden oben offenen Thermometer. Durch diese Linksbewegung wird auch das Wägelchen x (Fig. 297) nach links gezogen, auf welchem sich ein Morse'scher Telegraph befindet, ein Hufeisen mit Anker und Ankerhebel, dessen Schreibstift indessen gewöhnlich das Papier nicht berührt. Der Draht dieses Hufeisens kommt aber nicht direct von dem pos. Pole der Batterie, sondern geht vorher

Fig. 296.



über den Anker und den Schraubenstift des Relais M, und nachher in die Kugel des trockenen Thermometers, während der neg. Poldraht mit dem Platindrahte n dieses Thermometers verbunden und demnach beim Eintauchen von n der Strom geschlossen ist. Der pos. Poldraht einer zweiten Batterie geht um das Hufeisen des Relais M und von da in die Kugel des nassen Thermometers, während der neg. Draht an den Platindraht m geht;

Fig. 297.



da das Quecksilber hier tiefer steht, so taucht dieser Draht später ein als n, der erste Strom wird eher geschlossen als der zweite. Bei dieser Schließung, also im Moment des Eintauchens von n wird der Morse'sche Telegraph in Bewegung gesetzt und drückt seinen Stift auf das Papier, während dieser Apparat mit seinem Wägelchen die Linksbewegung des großen Hebels theilt und dadurch eine wagrechte Linie auf die Tafel zeichnet; diese ist zu Ende, wie m in das nasse Thermometer taucht; denn in diesem Augenblicke wird

der Strom des Relais M geschlossen und der Anker desselben von seinem Stifte abgezogen; sowie aber diese Berührung aufhört, ist der erste Strom geöffnet, der Morse'sche Telegraph arbeitet nicht mehr, die gerade Linie ist zu Ende; folglich gibt die Länge dieser geraden Linie den Thermometerunterschied und mit diesem den Grad der Feuchtigkeit zu erkennen. — Für alle diese einzelnen Linien müssen bei jedem Apparate erst die constanten Größen bestimmt werden, durch deren Multiplication mit den Liniengrößen sich dann die einzelnen Wettergrößen ergeben. — Dieser römische sowie der schweizer Meteorograph erweckten großes Interesse auf der Weltausstellung von 1867 in Paris, und können, wenn sie sich bewähren, für eine zukünftige Erkenntniß des Wetters von großer Wichtigkeit sein. Der Meteorologe Wild von Bern sagt: „Die selbstregistrirenden Wind- und Regenmesser unserer Sternwarte haben in den zwei letzten Jahren über die Wind- und Regenverhältnisse Berns viel vollständigere Aufschlüsse gegeben als 20jährige in gewöhnlicher Weise angestellte frühere Beobachtungen. Wir können demnach hoffen, in wenigen Jahren auch die Erforschung unseres Klimas zu einem gewissen Abschlusse gebracht zu haben.“ Wild hat nämlich schon von 1861—64 auf der Berner Sternwarte allmälig durch den Mechaniker Hasler einen Meteorograph zusammenstellen lassen, in welchen die Zeichen auf eine für ein Jahr ausreichende und sich allmälig abwickelnde Rolle von Papier ohne Ende gemacht werden, und zwar in Gestalt von Punkten. Die Stifte werden nach je 10 Minuten auf das Papier gedrückt, erzeugen je einen Punkt und heben sich dann wieder, worauf das Papier um eine kleine Strecke verschoben wird; die zusammengehörigen Punkte bilden eine Curve, aus deren Verlaufe auf dem Coordinatennetze der Verlauf der einzelnen Wettererscheinungen erkannt wird. Auch in den einzelnen Apparaten weicht Wilds Meteorograph von dem Secchis ab; so wird für die Temperatur ein Messing-Stahl-Thermometer, für die Feuchtigkeit ein Haar-Hygrometer mit Achse und Zeiger von Aluminium verwendet. — Seitdem sind mancherlei selbstthätige meteorologische Instrumente construirt worden, welche dem Ziele zustreben, größere Einfachheit und Billigkeit mit größerer Sicherheit als bei den oben geschilderten zu vereinigen.

Die neuere Meteorologie (Mohn 1875) ist durch die Einführung der Gradienten und der barometrischen Minima der Vorherbestimmung des Wetters einen Schritt näher getreten. Wenn an irgend einem Orte ein Minimum herrscht, so strömt die Luft von allen Seiten nach dem Orte hin, wird aber nach Buys-Ballots Windregel von dieser Richtung nach rechts abgelenkt und zwar um so stärker, je schneller der Wind weht oder je größer die Gradienten sind; auf der Nordseite des Minimums herrscht N-O, auf der Westseite N-W, auf der Südseite S-W, auf der Ostseite S-O. Weiß man daher die Lage irgend eines Minimums, so kann man bis auf große Entfernungen die Windrichtungen angeben, und da das Wetter von den Windrichtungen abhängt, so läßt sich auch das Wetter auf 1—2 Tage im Voraus angeben. Für weite Strecken, für ganze Länder oder ganze Erdtheile wäre diese Angabe möglich, wenn man völlig im Klaren über die Wanderungen der Minima wäre; da man jedoch die Ursachen der Minima noch nicht in allen Fällen kennt, so ist auch noch keine Klarheit über den Weg eines solchen Minimums, über seine Geschwindigkeit u. s. w. vorhanden. Aus den Angaben der meteorologischen Centralstationen, z. B. den Publicationen der deutschen Sternwarte läßt sich manchmal die Richtung eines Minimums folgern und dann ein Schluß auf die Wetterbeschaffenheit der nächsten Tage ziehen. Außerdem sind solche Schlüsse auch aus der Lage der hohen und niederen Barometerstände möglich. Wenn z. B. die Publicationen der deutschen Seewarte ergeben, daß in Oesterreich ein niedriger und in der Nordsee ein hoher Barometerstand herrscht, so muß, da die Luft immer von Orten hohen Luftdrucks nach Orten niedrigen Luftdrucks strömt, bei einiger Andauer jenes Unterschiedes Deutschland nach kurzer Zeit von Nordwestwinden durchzogen werden, die sich dann bald in Nord- und Nordostwinde umdrehen müssen.

Register.

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.